

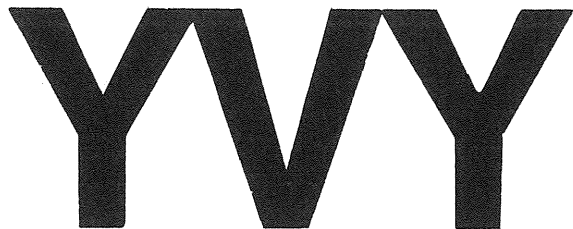
YVY

TUTKIMUS 16

Vedenjakelujärjestelmän toiminnallinen suunnittelu

yhdyskuntien vesi- ja ympäristöprojekti

HELSINKI 1976



TUTKIMUS 16

Vedenjakelujärjestelmän toiminnallinen suunnittelu

VESIHALLITUKSEN PROJEKTI N:o 7524 (toinen vaihe)

HELSINGIN TEKNILLINEN KORKEAKOULU

KARI SAARIKOSKI

VESIHALLITUKSEN PROJEKTI N:O 7526

INSINÖÖRITOIMISTO VIATEK OY

RISTO LAUKKANEN
ARVO ILMAVIRTA

HELSINGIN KAUPUNGIN VESILAITOKSEN PROJEKTI

RAINER LINDBERG
JORMA TSUBARI

yhdyskuntien vesi- ja ympäristöprojekti

HELSINKI 1976

ISBN 951-9250-65-4
ISSN 0355-1997

KYRIIRI OY
Luotsikatu 4, 00160 H:KI 16
PAINO: 90-630 230
MYynti: 90-440 211/KIRJAKAUPPA
RUNEBERGINK. 14—16
(H:GIN KAUPPAKORKEAKOULU)
00100 Helsinki 10

ESIPUHE

YVY-projektin keskeisiin tavoitteisiin kuuluu suunnittelumenetelmien kehittäminen. Veden jakelun osalta tähän tavoitteeseen pyrkivänä tutkimuksena valmistui aikaisemmin YVY-tutkimus 3 "Vesijohtoverkon toiminnan luotettavuus". Nyt kysymyksessä oleva tutkimus "Vedenjakelujärjestelmän toiminnallinen suunnittelu" perustuu osittain YVY-tutkimus 3:een, YVY-esitutkimukseen E-11 "Malliajattelun soveltaminen yhdyskuntien vesi- ja jätehuollon suunnitteluun" sekä Helsingin teknillisen korkeakoulun tekemään aloitteeseen simulointimallin hankkimisesta ja soveltamisesta Suomen oloihin.

Tässä tutkimuksessa käsitelty simulointimalli on saatu USA:sta, jossa se on kehitetty Office of Water Resources Research, U.S. Department of Interiorin toimesta. Projektin nimenä oli "Improved Methodology for Design of Water Distribution Systems". Simulointimallista on meillä käytetty nimilyhennettä WATSIM 2 (WATSIM-projekti). Tutkimus esittelee mallin ominaisuuksia ja edelleen kehittämistä. Mallin käyttäjälle tarkoitettu käyttöohje julkaistaan erillisenä YVY-sarjassa.

Simulointimallin käyttökelpoisuuden arvioimiseksi ja edelleen kehittämiseksi käynnistettiin myöhemmin kaksi ns. käyttöönottoprojektia. Toisen projektin kohteena oli Tuusulan Seudun Vesilaitoksen vedenjakelujärjestelmä ja toisen osa Helsingin kaupungin vesilaitoksen vedenjakelujärjestelmää. Ensin mainitusta, toiminnallista suunnittelua tutkivasta työstä on käytetty nimitystä TUVESI-projekti.

WATSIM-projektin rahoitti vesihallitus ns. YVY-määrärahasta (vesihallituksen projekti 7524) ja sen suoritti HTKK:n vesihuoltotekniikan oppituoli. Tutkijoina toimivat

dipl.ins. Kari Saarikoski (vesihuolto)

dipl.ins. Veikko Hytönen (tietojenkäsittely)

Tutkimuksen vastuullisena johtajana oli 1.4.1975 - 31.7.1975

vs. prof. Pentti Yletyinen ja 1.8.1975 alkaen prof. Eero Kajosaari.

TUVESI-projektin rahoitti vesihallitus ns. YVY-määrärahasta (vesihallituksen projekti n:o 7526) ja sen suoritti insinööritoimisto Viatek Oy. Tutkijoina olivat

dipl.ins. Risto Laukkanen ja

dipl.ins. Arvo Ilmavirta

Tutkimuksen vastuullisena johtajana oli 1.6.1975 - 31.7.1975 tekn.tri Pentti Yletyinen ja 1.8.1975 - 31.1.1976 dipl.ins. Tauno Skyttä.

Helsingin kaupungin vesilaitos kustansi omaa verkostoaan koskevan tutkimuksen. Tutkijoina olivat

dipl.ins. Rainer Lindberg ja

dipl.ins. Jorma Tsubari

Tutkimusta kokonaisuudessaan on valvonut seuraava ryhmä:

pj. dipl.ins. Erkki Nuutila, Helsingin kaupungin vesilaitos
dipl.ins. Antti Jokela, vesihallitus
dipl.ins. Jouko Liimatainen, Suomen Kaupunkiliitto
tekn.tri Pentti Yletyinen, Suomen Kaupunkiliitto (1.8. 1975 alkaen)
dipl.ins. Martti Myllyvirta, Tuusulan Seudun Vesilaitos
dipl.ins. Veli-Matti Tiainen, SITRA/YVY-projekti

Tutkimus aloitettiin 1.4.1975 ja saatiin valmiiksi 29.2.1976. Se vastaa asetettuja tavoitteita ja osoittaa simulointimallien käytökelpoisuuden vedenjakeluverkon toiminnallisessa suunnittelussa.

Yhdyskuntien vesi- ja ympäristöprojekti

SISÄLLYSLUETTELO

	sivu
ESIPUHE	I
SISÄLLYSLUETTELO	III
YHTEENVETO	VII
ENGLISH SUMMARY	XII
1. JOHDANTO	1
2. Atk:n KÄYTTÖ VESILAITOSTOIMINNASSA	8
2.1 Atk:n kehittämisen vaiheitus	9
2.2 Vesijohtoverkon suunnitteluun käytettävät atk-sovellukset	10
2.21 Sovellusten yleisluonne	10
2.211 Yleiskäyttöiset sovellukset	11
2.212 Yksilölliset sovellusmallit	11
2.22 Vesijohtoverkkojen asteittain tarkentuva suunnittelu	12
2.221 Suunnittelu ja muut vesilaitostoi- minnot	12
2.222 Suunnitelman asteittainen tarkenta- minen	13
2.3 Vedenjakelujärjestelmän keskitetty ja automaatti- nen käyttötarkkailu ja säätö	15
2.31 Johdanto	15
2.32 Tietokoneen käyttömuodot jakelujärjestelmän käytön ja valvonnan yhteydessä	16
2.33 Käytettävien laitteistojen pääpiirteet	20
2.34 Sovellettavien ohjelmistojen tehtävät	23
2.35 Täysautomaattinen ohjaus	24
2.351 Säädön tavoitteet	24
2.352 Tietojen kokoaminen	25
2.353 Säästösääntöjen kehittäminen	27
2.354 Jakelujärjestelmän simulointi	28
2.355 Täysautomaattisen optimaalisen säädön toteuttaminen	29
2.36 Avoimia kysymyksiä	30

3.	KOLMIOSAINEN, HIERARKINEN OHJAUKSEN OPTIMOINTIIN SOVELTUVA MALLI	31
3.1	Kuukausimalli	32
3.11	Kuukausimallin yleispiirteet	32
3.12	Kuukausimallille annettavat alkuarvot	33
3.13	Kuukausimallin antamat tulokset	34
3.2	Vuorokausimalli	34
3.21	Vuorokausimallin yleispiirteet	34
3.22	Vuorokausimallille annettavat alkuarvot	35
3.23	Vuorokausimallin antamat tulokset	36
3.3	Tuntimalli	36
3.31	Tuntimallin yleispiirteet	36
3.32	Tuntimallille annettavat alkuarvot	37
3.33	Tuntimallin antamat tulokset	38
3.4	Mallien keskinäinen käyttö	38
3.5	Yhteenvedo	39
4.	TUUSULAN SEUDUN VESILAITOS	41
4.1	Johdanto	41
4.2	Tuusulan Seudun Vesilaitoksen vedenjakelujärjestelmän kuvaus	41
4.21	Verkon kuvaus	41
4.22	Nykyiset säätöjärjestelyt	43
4.3	Malli (= pelkistetty verkko) ja sen kalibrointi	47
4.31	Verkon pelkistys ja pelkistetyn mallin kalibrointi	47
4.32	Kalibrointitulosten analysointi	53
4.4	WATSIM 2:n käytön tavoitteet	56
4.5	Mallin käyttösovellukset	57
4.51	Energiakustannusten säästö ohjauksen avulla	57
4.52	Hydraulisen ratkaisun valinta	61
4.53	Yläsäiliötilan riittävyys	62
4.54	Alasäiliön käyttö	65
4.55	Jakelujärjestelmän käyttövarmuus	68
4.56	Hyöty-kustannusanalyysi	69
4.57	WATSIM 2 suunnittelussa	71

5.	HELSINGIN VEDENJAKELUVERKOSTO	72
5.1	Alkuarvot	72
5.11	Johtotiedot	72
5.12	Painepiirit	72
5.13	Vesisäiliöt	73
5.14	Pumput	73
5.15	Säätöventtiilit	74
5.16	Kulutustiedot	74
5.2	Mallin kalibrointi	75
5.21	Mittaukset	75
5.22	Kalibroinnin suorittaminen	75
5.23	Kulutuskuvioiden kalibroinnissa käytetty ohjelma	77
5.3	Sovellus käytönvalvontaan ja ohjaukseen	79
5.31	Lähtötilanne	79
5.32	Tutkimuksen kulku	80
5.33	Lopputulos	80
5.4	Helsingin itäisten ja koillisten alueiden vedenjakelu vuosina 1980, 1985 ja 1990	81
5.42	Kulutukset	82
5.43	Tutkitut tapaukset	82
5.44	Yhteenvedo	87
5.5	Näkökohtia ohjelman käytöstä tutkituissa tapauksissa	88
5.51	Putkirikko	88
5.52	Itäisten ja koillisten alueiden vedenjakelu	89
6.	SOVELLUSESIMERKKIEN YHTEYDESSÄ SAADUT KÄYTTÖKOKEMUKSET	90
6.1	Yleiskokemukset	90
6.2	Pumppaamojen kuvaus	90
6.3	Venttiilin kuvaus	92
6.4	Muiden laitteiden kuvaus	93
6.5	Järjestelmän säädön kuvaus	93
6.6	Ohjelmassa havaittuja erikoispiirteitä	95
6.7	Tietokoneajon suoritus ohjelmalla	97
6.8	Ratkaisun konvergenssi	97
6.9	Laskentanopeus ja -kustannukset	98
6.10	Tarvittava muistikapasiteetti	99

7.	WATSIM 2-OHJELMAN SOVELTUVUUSALUE	101
7.1	Ohjelman edellyttämien lähtötietojen tarve ja hankintasuositus	101
7.11	Kenttäkoejärjestely järjestelmän kalibroimiseksi	102
7.2	Ohjelman soveltuvuusalueet	104
7.21	Suunnittelu ohjelman avulla	104
7.22	Ohjelma käytön yhteydessä	105
7.3	Ohjelman rajoitukset	106
7.4	Vertailu muihin ohjelmiin	107
7.5	Yhteenvedo	108
8.	JATKOTUTKIMUSTARVE	109
	KIRJALLISUUSLUETTELO	111
	LIITELUETTELO	113
	LIITTEET 1...43	

YHTEENVETO

Tutkimusraportti jakaantuu kahteen osaan seuraavasti:

- yleinen osa, jonka yhteydessä käsitellään atk:n merkitystä ja asemaa vesilaitostoiminnassa erityisesti automaattisen ohjauksen osana ja
- case-tapaukset, joiden avulla analysoidaan ohjelman WATSIM 2 soveltuvuutta käytännön suunnitteluun

Atk:n käyttö vesilaitostoiminnassa jakaantuu seuraavasti:

- taloudellis-hallinnolliset ohjelmistot
- suunnitteluohjelmistot sekä
- käsittelylaitosten ja vesijohtoverkon käyttötarkkailuun ja ohjaukseen liittyvät ohjelmistot

Taloudellis-hallinnollinen sovellusalue (mm. vesilaskutus, kirjanpito jne.) on hyvin laaja ja monitahoinen ja verrattain etäällä teknisistä sovelluksista.

Suunnitteluohjelmistot ovat yleensä verkon laajennussuunnitteluun tai ohjaussääntöjen suunnitteluun liittyviä sovelluksia. Verkon laajennussuunnitteluun voidaan käyttää optimointiin sekventiaalisesti perustuvia tai staattisen tilan ratkaisevia menetelmiä, kuten esimerkiksi ohjelma FLOW ja FRECO. Ohjelman WATSIM 2 avulla voidaan myös suorittaa verkon laajennussuunnittelua joko staattisen ratkaisun tai simuloinnin yhteydessä.

Kirjallisuusselvityksessä on tarkasteltu tietokoneen käyttömahdollisuuksia automaattisen käyttötarkkailun ja -ohjauksen osana sekä em. seikkoihin liittyviä ohjelmistoja. Käytetyt laitteistojärjestelyt vedenjakelujärjestelmän yhteydessä voidaan jakaa kolmeen ryhmään niiden tehtävien mukaan järjestelmän osana:

- I kenttätietojen keruu, valvonta ja tietojen tallentaminen
- II kenttätietojen keruu, valvonta ja kaukosäätö
- III kenttätietojen keruu, valvonta ja täysautomaattinen säätö

Mainitun kaltaiset järjestelmät on mahdollista toteuttaa erilaisin tietokonelaitteistoin yhdessä kaukomittaus- ja -säätöjärjestelmien avulla. Vaiheen III mukaista säätöä ei kirjallisuustietojen mukaan ole vielä käytössä vesilaitostoiminnassa.

Automaattisen ohjausjärjestelmän yhteydessä on mahdollista soveltaa hyvinkin monipuolisia säätötapoja, joiden määrittäminen on oma ongelmansa. Esimerkki tällaisesta on kolmiosainen, ohjauksen optimointiin soveltuva malli. Mallin yhteydessä käytännön optimointi tapahtuu kolmella eri tasolla. Ylemmän tason mallin antamat tulokset ovat samalla rajoituksia alemman tason mallille.

Helsingin jakeluverkon tutkiminen WATSIM 2 ohjelmalla

Helsingin jakeluverkossa tutkittiin WATSIM 2 ohjelman avulla kaksi tapausta:

1. sovellus käytön valvontaan ja ohjaukseen sekä
2. itäisten ja koillisten alueiden suunnitellun vedenjakelu-
järjestelmän toiminta vuosina 1980, 1985 ja 1990

Aluksi suoritettiin laaditun vesijohtoverkkomallin kalibrointi. Sitä varten tehtiin 26.6.1975 ympärivuorokautiset painemittaukset neljässä eri painepiirissä sijaitsevilla pisteillä. Lisäksi koottiin tiedot vesisäiliöiden vedenpinnoista, pumppujen käyttöajoista, korkeapainepumppaamoista pumpatuista vesimääristä sekä säätöventtiilien käytöstä. Eri kuluttajatyyppeiden kulutuskuviot muodostettiin suoritettujen mittausten perusteella, minkä jälkeen ne kalibroitiin siten, että niiden summa vastasi painepiirien kokonaiskulutusta.

Sovelluksena käytönvalvontaan ja ohjaukseen oli putkirikkotapaus kriittisessä pääjohdossa suurimman kulutuksen aikana. Vuodesta aiheutuvien haittojen minimoimiseksi tutkittiin viittä erilaista toimenpideohjelmaa. Havaittiin, että tutkittaessa WATSIM 2 ohjelman avulla putkirikkotapauksia, joudutaan tarkastelu suorittamaan iteratiivisesti. Tämä siksi, että kulutettuja vesimääriä ei las-

kenta-algoritimilla voidaan automaattisesti muuttaa, kun painetaso kulutuspisteissä laskee alle sallittujen minimipaineiden ja veden-saanti estyy näin osassa kulutusaluetta. Luotettavien tulosten saaminen edellyttää kulutuskuvioiden ja painetasojen keskinäisen riippuvuuden selvittämistä, mihin tarvitaan täydentävää käsinlas-kentaa iteraatioiden välillä.

Tutkittaessa Helsingin itäisten ja koillisten alueiden vedenjake-lua vuosina 1980, 1985 ja 1990 pyrittiin selvittämään edullisin säätövaihtoehto Myllypuron ja Roihuvuoren vesisäiliöiden rinnak-kaisen toiminnan kannalta. Lisäksi selvitettiin mahdollinen lisä-vesisäiliöiden rakentamisen ajankohta MaTaPuPu-alueella. Tutkimuk-sessa havaittiin ohjelman soveltuvan erittäin hyvin edellä mainit-tuihin tarkoituksiin. Samassa painepiirissä sijaitsevien Myllypu-ron ja Roihuvuoren säiliöiden vedenpintojen muutokset voitiin saa-da halutunlaisiksi kokeilemalla erilaisia säätövaihtoehtoja. Oh-jelman energiakustannuksia laskevan ominaisuuden ansiosta oli pumppujen ja venttiilien säätöjä suunniteltaessa mahdollista sa-malla pyrkiä myös mahdollisimman taloudellisiin ratkaisuihin.

Tuusulan Seudun jakeluverkon tutkiminen WATSIM 2 ohjelmalla

Ohjelman WATSIM 2 toisena sovelluskohteena oli Tuusulan Seudun Vesilaitoksen (Keravan ja Järvenpään kaupungit, Tuusulan kunta) vedenjakelujärjestelmä. Lukuisten vedenottamoiden, kolmen vesi-tornin, alavesisäiliön, paineenkorotuspumppujen ja venttiilien tehokas keskitetty ohjaus muodosti hyvin monitahoisen ohjausjär-jestelmän, jonka kuvaaminen simulointiohjelman avulla vaatii ai-kaa vievää kehittämistä. Mm. WATSIM 2:n kaksoissäätö (tapaus, missä yhtä pumppua tai venttiiliä ohjaa kaksi vesitornia) joudut-tiin koodaamaan ohjelmaan sekä muuttamaan tiedostojen, taulukoi-den ja parametrien dimensioita.

Tuusulan Seudun Vesilaitoksen (TSV) vedenjakelujärjestelmää ku-vaavan mallin luotettavuus tarkistettiin kalibroinnilla. Testi-ajankohdan todelliset ja simulointiohjelman laskemat vesisäiliöi-

den vedenpinnan korkeudet olivat koko testivuorokauden ajan lähellä toisiaan.

TSV:n jakelujärjestelmää kuvattiin kahdella mallilla. Voimakkaasti pelkistettyä ja siksi tietokonekustannuksiltaan edullista mallia käytettiin alustaviin tarkasteluihin.

WATSIM-2:n avulla kyettiin kehittämään sellainen säätöjärjestelmä, jonka avulla TSV:n järjestelmässä säästetään sähkön yötariffin hyväksikäytön avulla huomattavasti energiakustannuksissa. Simulointimallin tulosten perusteella voidaan myös lykätä eräiden kaavailtujen säiliöiden rakentamista. WATSIM 2:n avulla voitiin valita kolmesta hydraulisesta ratkaisusta se, jonka ohjausjärjestelmä takasi suurimman luotettavuuden.

Kun kehitettyä simulointiohjelmaa sovellettiin TSV:n jakelujärjestelmään, se osoittautui lopullisessa muodossaan varsin käyttökelpoiseksi. WATSIM 2:ta kannattaa käyttää nimenomaan yleissuunnittelun loppuvaiheessa, sillä alustavaan suunnitteluun soveltuvat pelkistetyimmät ohjelmistot.

Yleiset johtopäätökset ohjelman käytöstä

Case-tapauksista havaittiin, että kumpikin voitiin kuvata simulointimallilla. Saatujen kokemusten perusteella voidaankin todeta, että ohjelma on riittävän laaja Suomen oloihin ja tuskin minkään vesilaitoksen erityispiirteet estävät ohjelman käyttöä.

Esimerkkien yhteydessä havaittiin, että mallin avulla voidaan kuvata hyvinkin monimutkaisia säätöjärjestelmiä sekä tutkia niiden erilaisia säätötapoja.

Erityistä huomiota on kiinnitettävä ohjelman käytössä annettujen alkuarvojen oikeellisuuteen. Tässä suhteessa merkittävimpiä ovat tiedot kulutuksista, pumppukäyristä sekä karkeuskertoimista. Pumppukäyrät on yleensä aiheellista määrittää itse paikalla samoin kuin

kulutusarvot ja -vaihtelut. Sitä varten on tarpeen tehdä kenttäkoe-ohjelma.

Ohjelmalla on kaksi pääasiallista soveltuvuusaluetta: jakelujärjestelmään liittyvien suunnittelutehtävien suoritus sekä nykyisen järjestelmän kalibrointi ja sen ohjauksen tehostus.

Ohjelman avulla ei voida suoranaaisesti suunnitella, vaan suunnitteluprosessi on yritys-erehdys-tyyppistä, jossa kokeillaan erilaisten suunnitteluvaihtoehtojen toimintaa ja näistä valitaan edullisin.

WATSIM 2 ohjelma soveltuu sekä uusien että olemassa olevien järjestelmien suunnitteluun. Sen avulla voidaan suunnitella sekä verkko-laajennuksia että säiliötilan suuruutta ja edelleen jakelujärjestelmän ohjausta. Ohjelman avulla voidaan tarkastella myös jakelujärjestelmän käyttötaloutta.

ENGLISH SUMMARY

The research report is divided into two parts as follows:

- general part, discussing the role and significance of automatic data processing in the operation of water distribution systems, in particular as part of automatic control, and
- case studies, by means of which the applicability of the WATSIM 2 program into practical planning is analyzed.

The utilization of ADP in the operation of water distribution systems is divided as follows:

- programs for economic and administrative applications
- programs for planning purposes
- programs connected with monitoring and control of treatment plants and distribution networks

The range of economic and administrative applications is very large and varied. It also is rather far from technical applications.

The programs for planning purposes generally are applications connected with planning of network extensions or devising of control strategies.

For planning of network extensions, methods based on sequential optimization or solving static states, as the programs FLOW and FRECO for example, may be used. The WATSIM 2 program may also be used for planning of network extensions, in connection of either static solution or simulation.

The applicability of computers as parts of automatic monitoring and control of operation, and programs connected have been investigated as a literature review. The computer applications used in water distribution systems, by considering their functions in the system, may be classified into three groups as follows:

- I Data acquisition, monitoring, and logging
- II Data acquisition, monitoring, and remote control (superviso-

ry control)

III Data acquisition, monitoring, and closed loop control

The systems described above may be accomplished by means of various computer applications connected with remote sensing and control equipment. According to literature, the III phase control has not yet been applied in water distribution systems.

In an automatic control system, even very complex ways of control may be applied, the determination of which is a problem itself. An example of this is a hierarchical model in three parts, appropriate to optimization of control. In this model, practical optimization takes place on three different levels. The results given by an upper level model at the same time are limits to a lower level model.

Examination of the Helsinki water distribution network by the WATSIM 2 program

In the Helsinki water distribution network, two cases were studied by the WATSIM 2 program:

1. application into monitoring and control of operation, and
2. operation of the planned water distribution system for the eastern and northeastern areas in 1980, 1985 and 1990.

First the calibration of the prepared model of water distribution network was done. For this purpose, pressure was measured at several points situated within four different pressure zones during 24 hours on 26 June, 1975. Further, data of water levels of reservoirs, operation times of pumps, amounts of water pumped from high pressure pumping stations, and of use of control valves was gathered. Basing on performed measurements, consumption patterns for different types of consumers were drawn up and then calibrated so as to conform to the total consumption of respective pressure zones when summed up.

Application into monitoring and control of operation was studied in the case of pipe breakage in a critical feeder main during maximum demand. For minimizing the disturbance caused by such leakage, five different proceedings were considered. The examination of pipe breakage cases with the WATSIM 2 program has to be done by iteration, as it was noted in the study. This is caused by the fact that consumed amounts of water can not be automatically adjusted by the calculation algorithm when the level of pressure at consumption points falls under allowed minimum pressures and water supply thus in part of consumption area gets interrupted. For obtaining reliable results, the interdependence of consumption patterns and levels of pressure has to be determined, which requires complementary manual calculation between iterations.

When examining the water distribution of the eastern and north-eastern areas of Helsinki in 1980, 1985 and 1990, the objective was set to finding the most advantageous alternative of control with regard to simultaneous operation of the reservoirs of Myllypuro and Roihuvuori. Further, the timing of construction of eventually needed additional reservoirs in the MaTaPuPu area was determined. In the study, the program proved very suitable to the applications described above. The fluctuations in the level of water of the reservoirs of Myllypuro and Roihuvuori, situated in the same pressure zone, could be adjusted as required by testing different alternatives of control. Owing to the ability of the program to calculate costs of energy, it was also possible to strive for solutions as economical as possible when planning the control of pumps and valves.

Examination of the Tuusula region water distribution system by the WATSIM 2 program

Besides Helsinki, the WATSIM 2 program was applied to the water distribution system of the Tuusula Region Waterworks (towns of Kerava and Järvenpää and commune of Tuusula). The centralized control of numerous water intakes, three elevated reservoirs,

a ground reservoir, booster pumps and valves composed a very complex control system, the representing of which by means of the simulation program required time-consuming development. Among other things, the double control of the WATSIM 2 (the case where one pump or valve is controlled by two elevated reservoirs) had to be coded into the program and dimensions of tables and parameters had to be altered.

The reliability of the model representing the water distribution system of the Tuusula Region Waterworks (TSV) was checked by calibration. The actual heights of the level of water in reservoirs during the test period and those calculated by the simulation program were close to each other for all the test day.

The distribution system of the TSV was represented by two models. A strongly reduced one, therefore causing smaller computer costs, was used for preliminary examinations.

By means of WATSIM 2, a control system could be developed that produces considerable savings in energy costs to the TSV system in operation based on the night tariff of electric power. Basing on the results of the simulation model, construction of certain projected reservoirs may also be postponed. By means of WATSIM 2 it was possible to choose of three hydraulic solutions the one whose control system assured the greatest reliability.

When the developed simulation program was applied to the distribution system of the TSV, it proved very apt in its final form. Especially profitable is the utilization of WATSIM 2 in the last phase of general planning, for also programs with lesser sophistication are suitable for preliminary planning.

General conclusions about the use of the program

In the performed case studies it was noted that both cases in question could be represented by the simulation model. Based on

the gained experience it may be stated that the program is extensive enough for Finnish conditions and that hardly any specific aspects of a single water distribution system make the program inapplicable.

In the examples it became apparent that by means of the model even very complex control systems may be represented and their various ways of control studied.

Special attention has to be paid to the correctness of the given initial data. In this respect the most critical are the data of consumptions, pumping patterns and roughness coefficients. Generally it is advisable to determine pumping patterns as well as values and fluctuations of consumption on the spot. A program of field experiments has to be prepared for this purpose.

The program has two main fields of application: execution of planning tasks, and calibration and intensification of control of existing systems.

The program is not directly capable of planning, but the planning process is of the trial and error type thus consisting of testing the operation of different planning alternatives in order to choose the most advantageous of them.

As a conclusion of the field of application of the WATSIM 2 program, it may be stated that the program suits to planning of both new and existing systems. By means of the program, both extensions of network and capacity of reservoirs, and further the control of a distribution system, may be planned. The operation economy of distribution systems may also be studied by the program.

1. JOHDANTO

Vedenjakelujärjestelmän tehtävänä on siirtää vettä vesijohtoja pitkin vedenottamoista ja vedenpuhdistuslaitoksista yhdyskuntaan eri toiminnoissa käytettäväksi. Vesi syötetään kulutukseen vedenpuhdistuslaitoksista, jotka toimivat kunakin vuorokautena vakiotehoisella vesimäärällä. Veden hetkelliset huippukulutusarvot ovat tätäkin suuremmat. Puhdistuslaitosten tehon ylittävä osa joudutaan ottamaan vesisäiliöistä, jotka puolestaan täytetään puhdistamoiden tehon ylittäessä hetkellisen kulutuksen suuruuden. Tarvittava tasaus-tilavuus määräytyy puhdistuslaitoksen mitoitus-tehon mukaan.

Jakelujärjestelmät ovat monimutkaisia. Niissä on useita ottamoita, vedenpuhdistuslaitoksia ja säiliöitä. Puhdistuslaitosten ja säiliöiden toiminnan hallinta ja järjestelmän taloudellinen energiankäyttö edellyttävät järjestelmän sopivaa käyttötapaa, jolloin voidaan myös taata riittävä vesimäärä ja riittävät paineet kulutusalueilla. Siksi järjestelmä varustetaan erilaisilla säätölaitteilla, joiden avulla se sopeutetaan dynaamisiin olosuhteisiin manuaalisesti tai automaattisesti, toisin sanoen näin tasataan kulutusvaihtelut. Säätölaitteita ovat mm. pumput ja erilaiset venttiilit. Pelkkä säätö ei kuitenkaan takaa järjestelmän tyydyttävää toimintaa kulutuksen kasvaessa, vaan lisäksi tarvitaan täydennyssuunnittelua. Tämä tarkoittaa pumpputehojen lisäämistä, lisäsäiliötilavuuden ja johtojen rakentamista sekä säätöjärjestelmän täydentämistä.

Säätötapa ei ainoastaan takaa riittäviä paineita ja vesimääriä kulutusalueilla. Mikäli järjestelmän säätötapa on huono, saattaa säiliöiden ja puhdistamojen käyttö olla tehotonta, mikä johtaa kapasiteetin turhaan lisäämistarpeeseen. Huono säätötapa saattaa myös lisätä huomattavasti järjestelmän energiakustannuksia. Taloudellisten säätösäätöjen ja -tapojen hakeminen onkin ensiarvoisen tärkeää.

Säätölaitteiden tarpeen arviointi, jakelujärjestelmän laajennus-

ten suunnittelu, säätöjärjestelmän tehokkuuden lisäämisen suunnittelu ja säätöjärjestelmän taloudellisuuden parantamisen suunnittelu edellyttävät mahdollisuutta tarkastella jakeluverkon toimintaa (ts. kulutuspisteiden paineiden ja vesimäärien riittävyttä sekä verkon laitteiden toimintaa) kulutuksen vaihdellessa ja järjestelmän ollessa tietyllä tavalla säädetty. Tarkastelujakson pituus määräytyy ominaisjakson mukaan, joka on yleensä vuorokausi, koska tietyt kulutusvaihtelut toistuvat vuorokausittain ja ylivuorokautista veden varastointia säiliöihin ei suoriteta.

Säädetyn jakelujärjestelmän simulointimalli (WATSIM 2) on tarkoitettu mainittuihin tarkasteluihin. Sen avulla voidaan simuloida jakelujärjestelmän toimintaa ja toiminnan taloudellisuutta, kun jakelujärjestelmä ja säätöjärjestelmä on tunnettu. Kokeilemalla erilaisilla jakelujärjestelmän rakenteilla ja säätöjärjestelmillä voidaan kokeellisesti hakea parhaat ratkaisut. Tämä julkaisu esittää mallin käyttöä suunnittelun apuvälineenä Tuusulan Seudun ja Helsingin kaupungin vesilaitoksen vesijohtoverkoissa. Lisäksi julkaisussa on pyritty kartoittamaan yleisesti vedenjakelujärjestelmien säätöön liittyviä kysymyksiä.

Tutkimusraportti jakaantuu kolmeen osaan seuraavasti:

- yleinen osa, jossa käsitellään atk:n merkitystä ja asemaa vesilaitostoiminnassa, erityisesti automaattisen ohjauksen osana
- case-tapauksissa tutkittiin WATSIM 2:n soveltuvuutta käytännön vesilaitostoimintaan
- käytetyn simulointimallin soveltuvuuden arviointi ja käyttökokemusten raportointi

Raportin ensimmäisessä osassa on selvitetty atk:n käyttöä vesilaitostoiminnassa. Tarkastelun kohteena ovat olleet sovellettavat ohjelmat seuraavasti:

- taloudelliset-hallinnolliset ohjelmistot
- suunnitteluohjelmistot
- käsittelylaitoksen ja vesijohtoverkon käyttötarkkailuun ja ohjaukseen liittyvät ohjelmistot

Taloudellis-hallinnollinen sovellusalue on hyvin laaja ja monitahoinen. Se on myös varsin etäällä teknisistä sovelluksista, eikä tässä yhteydessä ole katsottu aiheelliseksi alueen tarkkaa selvittämistä.

Suunnitteluohjelmistot ovat yleensä verkon laajennussuunnitteluun tai ohjaussääntöjen suunnitteluun liittyviä sovelluksia. Verkon laajennussuunnitteluun voidaan käyttää lineaariseen ohjelmointiin sekventiaalisesti perustuvaa metodiikkaa, jolloin tehtävän varsinaisena ratkaisevana ohjelmana voidaan käyttää jotakin lineaarisen ohjelmoinnin standardiohjelmaa esim. UNIVAC 1108:n ohjelmista LP ILONA:a. Muina ohjelmina voidaan käyttää staattisen tilan ratkaisevaa ohjelmaa FLOW tai FRECO. Ohjelmassa FRECO voidaan tuntemattomien solmupaineiden lisäksi ratkaista tuntemattomia kulutuksia ja putkivastuksia tietyin rajoituksin. Myös ohjelman WATSIM 2 avulla voidaan suorittaa verkon laajennussuunnittelua joko staattisen ratkaisun tai simuloinnin yhteydessä.

Raporttiin on liitetty myös kirjallisuustutkimus, joka selvittää tietokoneen käyttömahdollisuuksia automaattisen käyttötarkkailun ja -ohjauksen osana sekä mainittuihin seikkoihin liittyviä ohjelmistoja.

Tietokoneen avulla suoritettulla säädöllä ja valvonnalla saavutetaan seuraavanlaisia etuja:

- vedenjakelun palvelutaso paranee
- käyttövarmuus kasvaa
- säätösuoritus nopeutuu
- käyttökustannukset alenevat säästöistä energian kulutuksessa ja eri vedenottamoiden taloudellisesta käytöstä
- mahdollisuus automaattiseen kenttätietojen käsittelyyn
- mahdollisuus järjestelmän toiminnan ennakoimiseen ja systeemis suunnitteluun

Vedenjakelujärjestelmän yhteydessä käytetyt laitteistosysteemit voidaan jakaa kolmeen ryhmään riippuen niiden tehtävistä järjestelmän osana:

- I kenttätietojen keruu, valvonta ja tietojen tallentaminen
- II kenttätietojen keruu, valvonta ja kaukosäätö
- III kenttätietojen keruu, valvonta ja täysautomaattinen säätö

Tällaiset järjestelmät on mahdollista toteuttaa erilaisin tietokonelaitteistoin yhdessä kaukomittaus- ja säätöjärjestelmien avulla. Vaiheen III mukaista säätöä ei kirjallisuustietojen mukaan ole vielä käytössä vesilaitostoiminnassa.

Automaattiseen ohjausjärjestelmään on mahdollista soveltaa kehittyneitä säätötapoja, joiden määrittäminen on oma ongelmansa. Raportissa on esitetty kolmiosainen, hierarkkinen, ohjauksen optimointiin soveltuva malli. Mallin yhteydessä käytännön optimointi tapahtuu kolmella eri tasolla. Ylemmän tason mallin antamat tulokset ovat samalla rajoituksia alemman tason mallille. Tämä varmistaa sen, että saavutetaan kokonaisoptimi koko tarkasteltavan ajanjakson aikana.

Helsingin jakeluverkossa tutkittiin WATSIM 2-ohjelman avulla kaksi tapausta:

1. sovellus käytön valvontaan ja ohjaukseen
2. itäisten ja koillisten alueiden vedenjakelu vuosina 1980, 1985 ja 1990

Aluksi suoritettiin laaditun vesijohtoverkkomallin kalibrointi. Sitä varten tehtiin 26.6.1975 ympärivuorokautiset painemittaukset neljässä eri painepiirissä sijaitsevilla pisteillä. Lisäksi koottiin tiedot vesisäiliöiden vedenpinnoista, pumppujen käyttöajoista, korkeapainepumppaamoista pumpatuista vesimääristä sekä säätöventtiilien käytöstä. Eri kuluttajatyypien kulutuskuviot muodostettiin suoritettujen mittausten perusteella, minkä jälkeen ne kalibroitiin siten, että niiden summa vastasi painepiirien kokonaiskulutuksen vaihtelua.

Käytönvalvonnan ja ohjauksen sovelluksena oli putkirikko kriittisessä pääjohdossa suurimman kulutuksen aikana. Vuodosta aiheutu-

vien haittojen minimoimiseksi tutkittiin viittä erilaista toimenpideohjelmää. Havaittiin, ettei WATSIM-ohjelma sellaisenaan sovellu putkirikon tutkimiseen, koska kulutetut vesimäärät eivät muutu automaattisesti, vaikka painetaso kulutuspisteissä laskee tuntuvasti. Todellisuudessa painetasojen laskiessa vuotovesimäärä ja kulutus vähenevät asteittain. Luotettavien tulosten saaminen edellyttää kulutuskuvioiden muuttamista painetason muutoksen mukaisesti, mikä edellyttää käsinlaskentaa.

Tutkittaessa Helsingin itäisten ja koillisten alueiden vedenjakelua vuosina 1980, 1985 ja 1990 pyrittiin selvittämään edullisin säätövaihto Myllypuron ja Roihuvuoren vesisäiliöiden rinnakkaisen toiminnan kannalta. Lisäksi oli tarkoitus selvittää mahdollinen vesisäiliötarpeen ajankohta MaTaPuPu-alueella. Tutkimuksessa havaittiin ohjelman soveltuvan erittäin hyvin näihin tarkoituksiin. Samassa painepiirissä sijaitsevien Myllypuron ja Roihuvuoren säiliöiden vedenpintojen muutokset voitiin saada halutunlaisiksi erittäin havainnollisesti kokeilemalla erilaisia säätövaihtoehtoja. Ohjelman energiakustannuksia laskevan ominaisuuden ansiosta oli pumppujen ja venttiilien säätöjä suunniteltaessa mahdollista samalla pyrkiä myös mahdollisimman taloudellisiin ratkaisuihin.

Ohjelman WATSIM 2 toisena sovelluskohteena oli Tuusulan Seudun Vesilaitoksen (Keravan ja Järvenpään kaupungit, Tuusulan kunta) vedenjakelujärjestelmä. Lukuisten vedenottamoiden, kolmen vesitornin, alavesisäiliöiden, paineenkorotuspumppujen ja venttiilien tehokas keskitetty ohjaus oli hyvin monitahoinen järjestelmä, jonka kuvaaminen simulointiohjelman avulla vaatii kehittämisaikaa. Mm. WATSIM 2:n kaksoissäätö (tapaus, missä yhtä pumppua tai venttiiliä ohjaa kaksi vesitornia) jouduttiin korjaamaan sekä muuttamaan tiedostojen, taulukoiden ja parametrien dimensioita.

Tuusulan seudun vesilaitoksen (TSV) vedenjakelujärjestelmää kuvaavan mallin luotettavuus tarkistettiin kalibroinnilla. Testiajan kohdan todelliset ja simulointiohjelman laskemat vesisäiliöiden vedenpinnan korkeudet olivat koko testivuorokauden ajan lähellä toisiaan.

TSV:n jakelujärjestelmää kuvattiin kahdella mallilla. Voimakkaasti pelkistettyä ja siksi käyttökustannuksiltaan edullista mallia käytettiin alustaviin tarkasteluihin. Lopulliset tulokset perustuivat tarkan, vain vähän pelkistetyn mallin käyttöön.

WATSIM 2:n avulla kyettiin kehittämään sellainen säätöjärjestelmä, jonka avulla TSV:n järjestelmässä päästään sähkön yötariffin hyväksikäyttöön perustuvassa ohjelmassa 7...10 %:n säästöihin energiakustannuksissa. Lisäksi simulointiohjelmalla todettiin säiliökapasiteetin riittävän ohjevuoteen 1985 asti, kun taas Suomen Kaupunkiliiton julkaisussa "Vedenjakelujärjestelmän yleiset mitoitusohjeet" edellytetään v. 1976 tarvittavan lisäsäiliötilaa. WATSIM 2:n avulla voitiin valita kolmesta hydraulisesta ratkaisusta se, jonka ohjausjärjestelmä takasi suurimman luotettavuuden. Alavesisäiliölle kyettiin suunnittelemaan ohjaustapa, joka kaksinkertaistaa aläsäiliön vuorokautisen käytön.

Kun kehitettyä simulointiohjelmaa sovellettiin TSV:n jakelujärjestelmään, se osoittautui varsin käyttökelpoiseksi. WATSIM 2:ta kannattaa käyttää nimenomaan detaljisuunnitteluun, sillä alustavaan suunnitteluun soveltuvat halvemmat ja karkeammat ohjelmistot.

Case-tapauksista kumpikin tapaus voitiin kuvata simulointimallilla. Saatujen kokemusten perusteella voidaan todeta, että ohjelma on riittävän laaja Suomen oloihin ja tuskin minkään vesilaitoksen erityispiirteet estävät ohjelman käyttöä.

Esimerkeistä havaittiin, että mallin avulla voidaan kuvata hyvinkin monimutkaisia säätöjärjestelmiä sekä tutkia luotettavasti niiden erilaisia säätötapoja.

Erityistä huomiota ohjelman käytössä on kiinnitettävä annettujen alkuarvojen oikeellisuuteen. Tässä suhteessa merkittävimpiä ovat tiedot kulutuksista, pumppukäyristä sekä karkeuskertoimista. Pumppukäyrät on yleensä aiheellista määrittää itse paikalla samoin kuin kulutusarvot ja -vaihtelut. Tätä varten on tarpeen kenttäkoeohjelma.

Ohjelmalla on kaksi pääasiallista soveltuvuusaluetta: jakelujärjestelmän uusien suunnittelutehtävien suoritus sekä nykyisen järjestelmän kalibrointi ja sen ohjauksen tehostus.

Ohjelman avulla ei voida suoranaisesti suunnitella, vaan suunnitteluprosessi on yritys-erehdys-tyyppistä, jossa kokeillaan erilais-ten suunnitelmavaihtoehtojen toimintaa.

WATSIM 2-ohjelma soveltuu sekä uusien että olemassa olevien järjestelmien suunnitteluun. Sen avulla voidaan suunnitella sekä verkko-laajennuksia että säiliötilan suuruutta ja edelleen jakelujärjestelmän säätöä. Ohjelman avulla voidaan myös tarkastella jakelujärjestelmän käyttötaloutta.

Muihin ohjelmiin verrattuna WATSIM 2 on monessa suhteessa kehittyneempi ja käyttökelpoisempi. Tarkasteluajanjaksona on 1...2 vrk ja säädön kuvaus on mahdollinen. Toisaalta ohjelma ei mitoittele eikä siinä ole ratkaisun sensitiivianalyysiä.

WATSIM 2 on arvokas lisä vedenjakelujärjestelmää laskeviin ohjelmiin.

2. Atk:n KÄYTTÖ VESILAITOSTOIMINNASSA

Vesi- ja viemärilaitostoiminnan yhtenäinen organisaatio mahdollistaa koordinoitun atk:n käytön suunnittelun. On kuitenkin muistettava, että muutkin yhdyskuntien osatoiminnot tarvitsevat atk-palveluja, minkä vuoksi vesi- ja viemärilaitoksen atk-ratkaisuissa tulisi pyrkiä hyödyntämään mahdollisimman tehokkaasti yhdyskunnassa jo entuudestaan tarjolla olevia laite- ja henkilöresursseja. Myöskin vesi- ja viemärilaitoksen tulisi pyrkiä vaikuttamaan yhdyskunnan atk-toimintaan liittyviin ratkaisuihin.

Vesilaitoksen atk-ratkaisut tulisi tehdä erilaisten sovellusohjelmien tarpeesta ja käytöstä lähtien, pitäen selvästi mielessä tavoiteasettelun realistisuus ja kustannusvaikutukset. Vesilaitostoiminnan sovellusohjelmat voidaan jaotella seuraaviin ryhmiin:

- taloudellishallinnolliset ohjelmistot
- suunnitteluohjelmistot
- käsittelylaitoksen ja vesijohtoverkon käyttötarkkailuun ja ohjaukseen liittyvät ohjelmistot

Taloudellishallinnolliset ohjelmistot soveltuvat mm. laskutukseen, kassasuorituksiin, maksuliikenteeseen ja palkkalaskentaan. Usein näihin luetaan myös varaston valvontaan, huoltotoimintaan, jälkilaskentaan ja tilastointiin, ennusteisiin yms. liittyvät tietorekisterit ja niiden käsittelyohjelmistot. Taloudellishallinnollisten sovellusten tarve riippuu ensisijaisesti vesilaitoksen toiminnan laajuudesta. Hyvin toteutettuina ne tarjoavat vesilaitoksen johdolle erinomaista informaatiota päätöksenteon ja budjetoinnin pohjaksi sekä luotettavaa ja nopeasti saatavaa tietoutta kaikilta vesilaitostoiminnan osa-alueilta. Näin korostuu vesilaitoksen hallinnollisen johdon tavoitteellisuus näitä sovelluksia kehitettäessä.

Suunnitteluohjelmistot ovat yleensä verkon laajennussuunnitteluun tai ohjaussääntöjen suunnitteluun liittyviä sovelluksia. Tärkeintä on ratkaista käytetäänkö yleiskäyttöisiä ohjelmistoja vai kehitetäänkö omat tapauskohtaiset ohjelmistot. Päätökseen vaikuttaa pää-

asiassa vesilaitoksen koko. Mikäli päädytään yleiskäyttöisiin ohjelmiin, useimmat niistä ovat hankittavissa vesilaitoksiin. Suunnitteluohjelmien tarpeeseen vaikuttavat vesilaitoksen koon lisäksi veden käytön kasvu ja vesilaitoksen luonne. Suunnitteluohjelmiin liittyviä päätöksiä tehtäessä otetaan vastuu vesilaitoksen teknisestä kehittämisestä ja vedenjakelujärjestelmän kehittämisen taloudellisuudesta. Suunnitteluohjelmat edellyttävät tiettyjä vaatimuksia taloudellis-hallinnollisten rekistereiden sisältöön sekä käyttötarkkailun toteuttamistapaan. Suunnitteluohjelmistoista tehtävät päätökset ovat kiinteä osa vesilaitoksen teknillistä johtamista.

Käsittelylaitoksen ja vesijohtoverkon käyttötarkkailun keskittäminen ja automaattinen raportointi sekä ohjauksen keskittäminen ja automatisointi ovat useimmiten ratkaisevimmat seikat atk-laitteistojen hankintapäätöksiä tehtäessä. Yleensä pelkkään käyttötarkkailun keskittämiseen ja automaattiseen raportointiin liittyvä laitelaitteisto ei riitä pienimmässä soveltuvassa koossaan muiden vesilaitostointojen atk-tarpeeseen. Sen sijaan automaattisen ohjauksen laitteistot, jotka tavallisesti toteutetaan kahteen rinnakkaiseen toisistaan riippumattomaan keskustietokoneeseen perustuvina, ovat riittävän suuria myös muihin vesilaitostoinnin tietojenkäsittelytarpeisiin. Tavallisimmin sovellettava periaate on tällöin, että toinen rinnakkaisyksikkö apumuisteineen hoitaa taloudellis-hallinnolliset sovellukset sekä suunnittelusovellukset. Käyttötarkkailuun ja ohjaukseen liittyvät ratkaisut ovat tapauskohtaisia. Nämä liittyvät keskeisesti vesilaitostoinnin käytön kehittämiseen ja käyttötalouteen samoin kuin ne vaikuttavat taloudellis-hallinnollisten rekistereiden ja raporttien rakenteeseen. Käyttötarkkailua ja ohjausta koskevat päätökset ovat osa vesilaitoksen teknillisen johdon toiminta-alueesta.

2.1 Atk:n kehittämisen vaiheet

Yleisesti vesilaitosten kannattaa toteuttaa atk-järjestelmänsä siten, että ensimmäisessä vaiheessa koulutetaan teknillinen johto

käyttämään suunnitteluohjelmia palveluyritysten tai laskentapalvelua tarjoavien keskusten kautta pyrkimään samalla käyttötarkkailun automaattiseen suorittamiseen ja raportointiin. Kun ensimmäinen vaihe hallitaan ja on saatu riittävä kokemus vesilaitoksesta ja atk:sta sekä tiedostettu lisäkehittämistarve, voidaan lähteä kehittämään ohjausjärjestelmiä ja hankkimaan omat tietokoneet. Tässä vaiheessa voidaan siirtää kaikki vesilaitoksen atk-toiminnot omille koneille sekä suorittaa tarvittava omien ohjelmistojen kehitystyö. Omien ohjelmien valmistaminen tulisi käynnistää heti laitteistotyyppin valinnan jälkeen eli huomattavasti ennen laitteistoasennuksia turhien viipymien välttämiseksi.

Koko atk-toiminnan kehittäminen vaatii vuosia. Sen tuloksena vesilaitoksella tulee olla sekä laitteistoista että ohjelmistoista pitkän ja lyhyen aikavälin suunnitelma. Laitteistojen hankinta sekä ohjelmistojen hankinta ja kehittäminen tulee pystyä vaiheittamaan laitoksen budjetin ja henkilöresurssien rajoissa. On myös muistettava, että atk-toiminta ulottuu sekä hallinnollisen että teknillisen johdon alueille ja tämän vuoksi vesilaitoksen tulee atk-suunnittelussa, joko omilla tai ostetuilla henkilöresursseilla, varmistaa näiden molempien alueiden täysipainoinen kehittäminen.

2.2 Vesijohtoverkon suunnitteluun käytettävät atk-sovellukset

2.21 Sovellusten yleisluonne

Vesijohtoverkkojen suunnitteluun käytettävät atk-sovellukset ovat teknis-tieteellisiä tietokonesovelluksia, joita usein kutsutaan myös matemaattisiksi malleiksi.

Useat teknisiin ongelmiin liittyvät matemaattiset mallit ovat suhteellisen yksinkertaisia, mutta ne sisältävät hyvin paljon erilaisia laskentaoperaatioita ja monia erilaisia osamalleja, minkä vuoksi tapahtuman analysointi numeerisesti on työlästä. Tämän vuoksi koko tapahtumaa kuvaavien mallien suoritus on pyritty rationalisoimaan kirjoittamalla peräkkäin ne loogiset etenemisvai-

heet, joita tapahtuman kuvaaminen edellyttää sekä jättämään rutii-
nilaskennan suorittaminen tietokoneelle. Tällöin puhutaan synty-
neestä atk-sovelluksesta.

Luonteensa perusteella atk-sovellukset voidaan jakaa yksilöllisiin
eli tapauskohtaisiin ja yleiskäyttöisiin. Jälkimmäisiä kutsutaan
usein valmisohjelmiksi.

2.211 Yleiskäyttöiset sovellukset

Yleiskäyttöisten sovellusten kehittäminen on ollut kaikkein suurin-
ta. Tyypillisiä mallien sovellusalueita ovat fyysisen suunnittelun
kohteet ja eräät yleissuunnittelun osakohteet. Luonteeltaan yleis-
käsitteiset mallit ovat tiettyyn rajattuun standardimuotoiseen
probleemaan soveltuvia.

Vaikkakin useat yleiskäyttöisistä sovelluksista ovat erinomaisen
sopivia oikeisiin kohteisiin, ei niitä oteta helposti suunnittelu-
käyttöön, koska niiden käyttöä pidetään riskialttiina. Valtion an-
tama käyttötuki pioneerikohteisiin on todettu tehokkaimmaksi ris-
kin poistamisessa. Mm. tämän tutkimuksen case-analyysit ovat esi-
merkkejä tällaisesta.

2.212 Yksilölliset sovellusmallit

Yksilölliset sovellukset laaditaan ongelmakohtaisiksi huomioon ot-
taen ongelman ominaispiirteet. Yksilöllisten sovellusten kehittä-
minen on voimistunut suuresti viime vuosina. Tämä osoittaa selväs-
ti, että ei matemaattiset mallit eikä pelkkä tietokonepalvelu tule
olemaan suunnitteluprosessin kiinteä osa kuten esimerkiksi perus-
tietojen keruu.

Yksilöllisten mallien tyypillisimpiä sovelluskohteita vesihuollos-
sa ovat vesijohtoverkkojen ohjaukseen ja käyttötarkkailuun käytet-
tävät sovellukset. Ohjaus- ja käyttötarkkailujärjestelmät ovat hy-
vin jakelujärjestelmäkohtaisia. Tämän vuoksi mainitut selvitykset

olisi perusteltua tehdä case-tutkimuksina.

2.22 Vesijohtoverkkojen asteittain tarkentuva suunnittelu

2.221 Suunnittelu ja muut vesilaitostoiminnot

Vesijohtoverkon suunnittelulla, käytöllä ja kunnossapidolla on keskinäinen vuorovaikutus. Näiden eri pääkomponenttien samanaikainen huomioon ottaminen ei kuitenkaan ole menetelmäteknisesti mahdollista ja tämän vuoksi vesijohtoverkon suunnittelu, käyttö ja kunnossapito käsitellään aina erillisinä.

Suunnittelun, käytön ja kunnossapidon riippuvuuksia voidaan havainnollistaa muutamalla esimerkillä. Vesijohtovuotojen vähentäminen on kunnossapitoa. Vuotojen vähentämisestä verkkoon pumpattavan veden määrä vähenee, mikä vähentää energiakustannuksia ja samalla verkon kuormitusaste pienenee, mikä puolestaan lykkää investointitarvetta. Lisäksi tämä pienentää vedenhankinta- ja vedenkäsittelykustannuksia sekä lykkää niihin liittyviä laajennusinvestointeja. Toinen esimerkki voidaan ottaa ohjaus- ja käyttötarkkailujärjestelmästä. Ohjauksen avulla voidaan pyrkiä käyttämään mahdollisimman taloudellisesti sähkö- ja pumppaamokapasiteetteja ja näin vähentämään energiakustannuksia. Ohjauksella voidaan pyrkiä myös käyttämään oleva kapasiteetti mahdollisimman tehokkaasti hyväksi ja näin lykkäämään uusinvestointeja. Ohjauksen käyttötarkkailulla voidaan pyrkiä havainnoimaan vesijohtovuodot mahdollisimman hyvin ja vähentämään näin vuotojen aiheuttamia ongelmia. Kuitenkin sekä kunnossapitotoiminnan tehostaminen että ohjausjärjestelmän parantaminen vaativat kustannuksia, jotka vähentävät nettohyötyä ja muuttavat sen tietyssä vaiheessa jopa negatiiviseksi.

Vesijohtoverkkojen suunnitteluun liittyvät atk-sovellukset palvelevat lähinnä yleissuunnittelua ja ohjausta. Yleissuunnitteluun liittyviä sovelluksia on olemassa valtaisa määrä, joista monia on käytettävissä myös Suomessa.

2.222 Suunnitelman asteittainen tarkentaminen

Yleissuunnittelun yhteydessä on saatu hyviä kokemuksia asteittain tarkentuvasta verkkosuunnittelusta, jossa tarkastelutapa ja tarkentuvien vaiheiden määrä valitaan tapauskohtaisesti. Kussakin tarkentuvassa vaiheessa käytetään vaiheeseen soveltuvaa standardiohjelmaa.

Ensimmäinen suunnitteluaste

Karkein suunnitteluaste on yleensä vedenhankintaan liittyvien pääsiirtoyhteyksien linjausten sekä mitoitus- ja rakentamisen ajoituksen valinta. Tällaisiin tarkasteluihin on kehitetty nopea ja suhteellisen monipuolinen lineaariseen ohjelmointiin sekventiaalisesti perustuva metodiikka. Kun ongelma on muotoiltu lineaariselle ohjelmoinnille soveltuvaksi, voidaan käyttää mitä tahansa lineaarisen ohjelmoinnin ratkaisevaa standarditietokoneohjelmaa. Yksityiskohtaisia tietoja löytyy monista julkaisuista /1,5/.

Soveltuva, helppokäyttöinen ja joustava ohjelmisto on mm. UNIVAC 1108 standardiohjelmisto LP ILONA.

Toinen suunnitteluaste

Toinen vesijohtoverkon yleissuunnittelun vaihe voisi olla esimerkiksi siirtoyhteyksien ja itse jakeluverkon lopullinen mitoitus ja staattisen toiminnan tarkastelu. Usein yleissuunnittelutehtävä on niin pelkistynyt, että karkeinta suunnitteluvaihetta ei tarvitse käyttää, vaan tämä suunnitteluvaihe sellaisenaan tai tarkimman suunnitteluvaiheen kanssa yhdessä on riittävä. Mitoitustarkastelu on voitu jokseenkin poikkeuksetta suorittaa normaaleilla vesijohtoverkon virtaus- ja painesuhteet laskevilla ohjelmilla (staattisen tilan laskevilla ohjelmilla) kokeilemalla. Staattisen tilan laskentaan on todettu nopeaksi ja luotettavaksi ohjelma FLOW /3,18/. Tällä ohjelmalla voidaan laskea johtovirtaamat ja solmupaineet, kun kulutukset, johto-, säiliö-, pumppaamo- ja venttiiliominaisuudet ovat tunnettuja.

Toinen monikäyttöinen staattisen tilan ratkaiseva ohjelma on ns. yleinen staattisen tilan ratkaiseva ohjelma FRECO /12,18/. Ohjelma soveltuu mm. seuraaviin tehtäviin /14/:

- johtovirtaamien ja solmupaineiden laskemiseen
- määrittelyyn, joilla selvitetään, paljonko tietystä verkon osasta saadaan vettä, jos pienin sallittu painetaso tunnetaan sekä millä toimilla saatavaa vesimäärää voidaan tehokkaimmin lisätä
- johtokarkeuksien määrittelyyn painemittausten ja kulutustietojen perusteella
- kunnossapidossa mm. hakemaan sellainen johtojen huuhtelujärjestys, joka aiheuttaa mahdollisimman vähäiset virtaustilan muutokset
- pumppujen ja säätöventtiileiden ominaiskäyrien laskemiseen esimerkiksi mahdollisimman hyvän säiliöiden käytön takaamiseksi

Kunnallistieto Oy /4/ omistaa ohjelman, joka staattisen tilan laskennan ohella mitoittaa johtokokoja verkkokohtaisen mitoituspainehäviön perusteella. Saman kaltainen ohjelma on käytössä Helsingin kaupungin vesilaitoksessa /6/ ja Teknillinen Laskenta Oy:ssä /15/.

Tässä raportissa lähemmin esitelty ohjelma WATSIM 2 soveltuu myös staattisen tilan ratkaisuun.

Kolmas suunnitteluaste

Yleissuunnittelun kolmas suunnitteluvaihe on ohjauslaitteiden tarpeen, sijoituksen ja toimintatavan suunnittelu sekä säiliötilatarpeen tarkka analysointi. Näihin on kehitetty tässä tutkimuksessa ohjelma WATSIM 2, jolla voidaan tarkastella vedenjakelujärjestelmän toimintaa ja käyttökustannuksia, kun siinä on toteutettu tietty ohjausjärjestelmä ja -periaate. Laskennan tuloksena saadaan tarkastelujakson aikana paineet solmuissa, virtaamat johdoissa, säiliöiden käyttö, pumppujen ja venttiilien toiminta sekä energia-kustannukset.

Tämä raportti esittelee ohjelman WATSIM 2 soveltuvuutta edellä kuvattuihin analyysihin kahden vedenjakelujärjestelmän case-projektissa: Tuusulan Seudun Vesilaitoksen ja Helsingin kaupungin Vesilaitoksen jakelujärjestelmien analysoinneissa.

Muista verkon toiminnan aikasimulointia suorittavista ohjelmista voidaan mainita Teknillinen Laskenta Oy:n /16/ ja Helsingin kaupungin sovellukset /7/. Ne ovat pääosin toistensa kaltaisia.

2.3 Vedenjakelujärjestelmän keskitetty ja automaattinen käyttötarkkailu ja säätö

Tämä luku on miltei suora käännös lähteen /11/ mukaisesta esityksestä, eikä tässä yhteydessä ole otettu huomioon Suomen ja USA:n olosuhteista johtuvia eroja. Luku onkin lähinnä informatiivinen ja suuntaa antava.

2.31 Johdanto

Automaattista valvontaa ja säätöä sekä paikallisena että keskitetynä on sovellettu useissa vedenjakelujärjestelmissä. Automatiikka, joka käyttää apuna releitä ja analogisia säätöelementtejä, käytetään pumppujen, venttiilien yms. ohjauksessa. Laajoissa järjestelmissä käytetään tiedon kaukosiirtoa mittaus- ja säätösignaalien välitykseen ohjauskeskuksen ja erilaisten mittaus- ja säätölaitteiden välillä.

Käyttämällä automaation yhteydessä tietokonetta voidaan valvontaa ja säätöjärjestelmän käyttöastetta entisestään parantaa. Liittämällä tietokone olemassa olevaan kaukomittausverkostoon voidaan mitattujen tietojen lajittelu ja tallentaminen suorittaa koneellisesti ja järjestelmän tila voidaan esittää näyttölaitteiden avulla. Tietokonejärjestelmän avulla on myös mahdollista toteuttaa kenttätietojen keruu ja suorittaa järjestelmän säätöä. Käyttökokemukset ovat osoittaneet, että tietokonelogiikkaa on perusteltua kehittää ja järjestelmän säätö suorittaa perustuen säiliöiden ve-

denpinnan korkeuksiin, paineisiin, virtaamiin jne. Tietokoneen ja ihmisen välinen tiedonvälitys perustuu näyttölaitteiden, piirtureiden ja kirjoituslaitteiden käyttöön, joiden avulla voidaan korvata suuret paneelit.

Seuraava vaihe tietokoneen soveltamisessa on jakelujärjestelmän käyttövarmuuden ja taloudellisuuden parantaminen. Siirryttäessä tietokoneen käytössä kenttätietojen keruusta ja käytön ohjauksesta järjestelmän käyttövarmuuden ja taloudellisuuden kehittämiseen tarvitaan ohjelmasovelluksia, jotka perustuvat reaaliaikatietoihin ja käyttäjän suorittamiin säätötapahtumiin. Nämä sovellusohjelmat edellyttävät, että järjestelmä kuvataan mallin avulla ja että kuvaukseen liittyvät matemaattiset funktiot voidaan optimoida.

Tietokoneen avulla suoritettun säädön ja valvonnan yhteydessä saavutetaan seuraavanlaisia etuja:

- vedenjakelun palvelutaso paranee
- käyttövarmuus kasvaa
- säätösuoritus nopeutuu
- käyttökustannukset alenevat säästöistä energian kulutuksessa ja eri vedenottamoiden taloudellisesta käytöstä
- mahdollisuus automaattiseen kenttätietojen käsittelyyn
- mahdollisuus järjestelmän toiminnan ennakoimiseen ja systeemi-suunnitteluun

2.32 Tietokoneen käyttömuodot jakelujärjestelmän käytön ja valvonnan yhteydessä

Käytetyt laitteistot vedenjakelujärjestelmän yhteydessä voidaan jakaa kolmeen ryhmään niiden tehtävien mukaan järjestelmän osana:

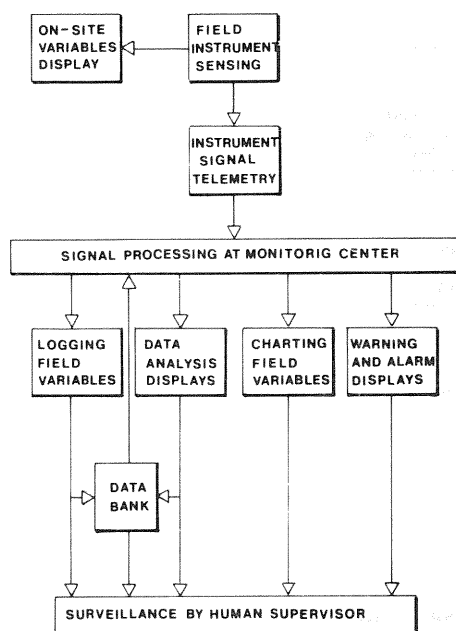
- I kenttätietojen keruu, valvonta ja tietojen tallentaminen
- II kenttätietojen keruu, valvonta ja kaukosäätö
- III kenttätietojen keruu, valvonta ja täysautomaattinen säätö

Seuraavassa lyhyt selostus kustakin eri vaiheesta.

Vaihe I: Tämänlaisessa sovelluksessa tietokonetta ja tiedon kaukomittausjärjestelmää käytetään kenttätietojen keruuseen, niiden esittämiseen sekä tietojen käsittelyyn ja tallentamiseen. Useimmis-
sa tapauksissa tietokoneen yhteyteen voidaan liittää reaaliajan käyttömahdollisuus sekä käyttää hyväksi olevia tiedonsiirto- ja -näyttölaitteita. Virtaamia, paineita ja säiliöiden vedenpinnankorkeuksia mittaavien antureiden lähettämät viestisignaalit syötetään suoraan tietokonelaitteistolle. Raakadatat muutetaan helposti ymmärrettävään muotoon ja talletetaan tiedostoon. Voidaan myös tarkistaa, onko asetettuja raja-arvoja ylitetty sekä tarvittaessa suorittaa hälytys. Tarpeellinen määrä tietoa talletetaan pitempiaikaista säilytystä varten, jotta muuttujien vaihteluista ja trendeistä päästään selville (myös laskemalla saadut arvot).

Tällaisen järjestelyn pääasialliset edut ovat seuraavat: (a) keskittetty käyttötietojen esitys; (b) kenttätietojen nopea saanti helposti luettavassa muodossa (manuaalista käsittelyä ei tarvita), (c) mahdollisuus aikaisempien käyttötietojen saantiin valmiiksi käsitellyssä muodossa esim. suunnittelua varten.

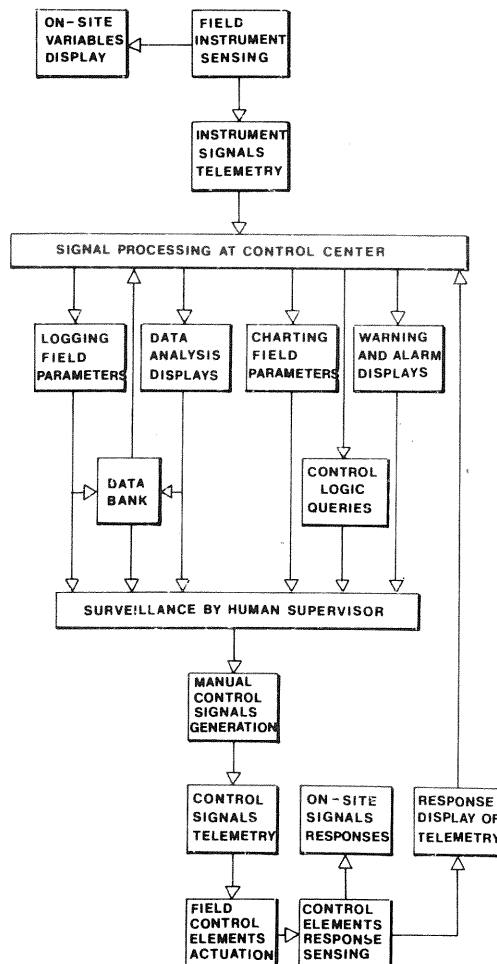
Edellä mainitunlainen järjestely on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Vaiheen I mukainen järjestely /8/.

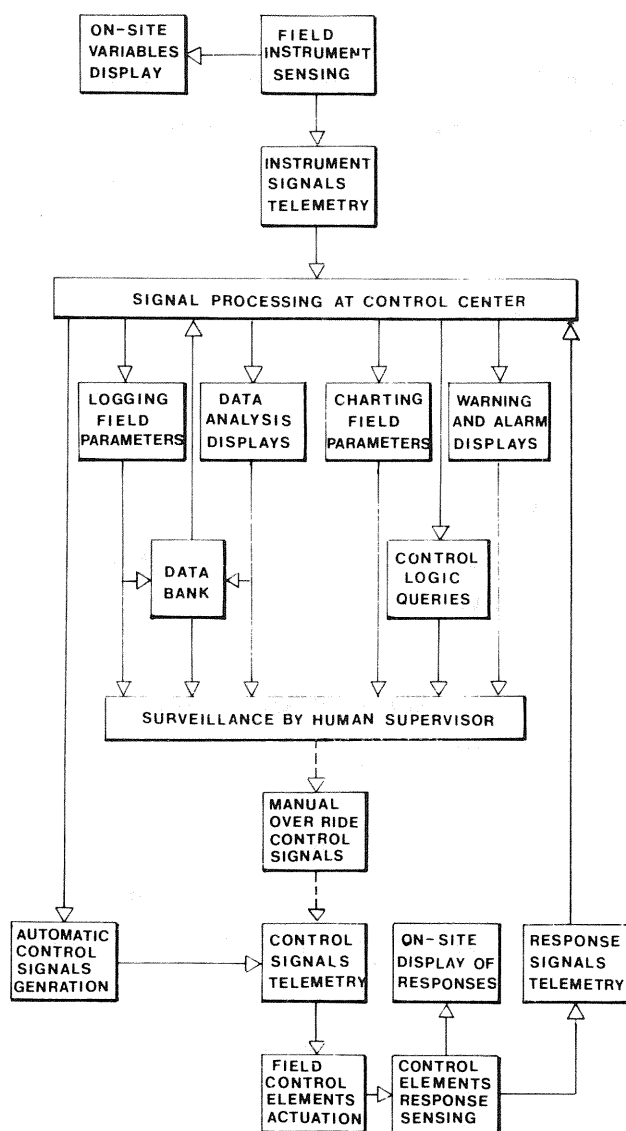
Vaihe II: Tämäntapainen järjestely on samanlainen kuin vaiheessa I kuvattu, mutta siinä on lisänä mahdollisuus kaukosäädön käyttöön esim. pumppujen, venttiilien yms. säädössä. Silloin kun kaukosäätöä on jo sovellettu, voidaan tietokonelaitteisto kytkeä suoraan olemassa oleviin viestilinjoihin. Muulloin uuden järjestelmän säätö- ja havaintopisteet varustetaan kaukokäyttöasemin. Tietokoneen ja ihmisen välinen tiedonvälitys on järjestetty siten, että käyttäjä saa tiedon järjestelmän tilasta ja voi suorittaa säätöjä. Tämä on yleensä hoidettu kuvaputkien ja ohjauspöytien avulla. Myös kaukokäyttöasemien yhteydessä voidaan käyttää tietokonetekniikkaa, joka mahdollistaa kenttätietojen keruun, tiedon muuttamisen digitaaliseksi sekä elementtien diskreettisen ja analogisen säädön. Digitaalisten kaukokäyttöasemien soveltaminen vähentää vuokrattujen viestilinjojen käyttökustannuksia sekä nostaa käyttövarmuutta verrattuna vastaavaan analogiseen järjestelmään.

Kuvassa 2 on esitetty kuvatun mukainen järjestely.



Kuva 2. Vaiheen II mukainen järjestely /8/.

Vaihe III: Tämä on vaiheiden I ja II kehittyneempi muoto, jossa tietokone on ohjelmoitu suorittamaan jakelujärjestelmän (pumppujen, venttiilien yms.) välitöntä säätöä. Tämäntapaisten säädön yhteydessä voidaan ohjaukseen soveltaa automaattisesti kehittyneitä säätösääntöjä (tavoitteena energian säästö, säiliöiden taloudellinen käyttö, paineiden seuranta yms.). Tämäntapaista säätöä ei ole vielä otettu käyttöön vesilaitostoiminnassa /8/. Järjestely on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Vaiheen III mukainen järjestely /8/.

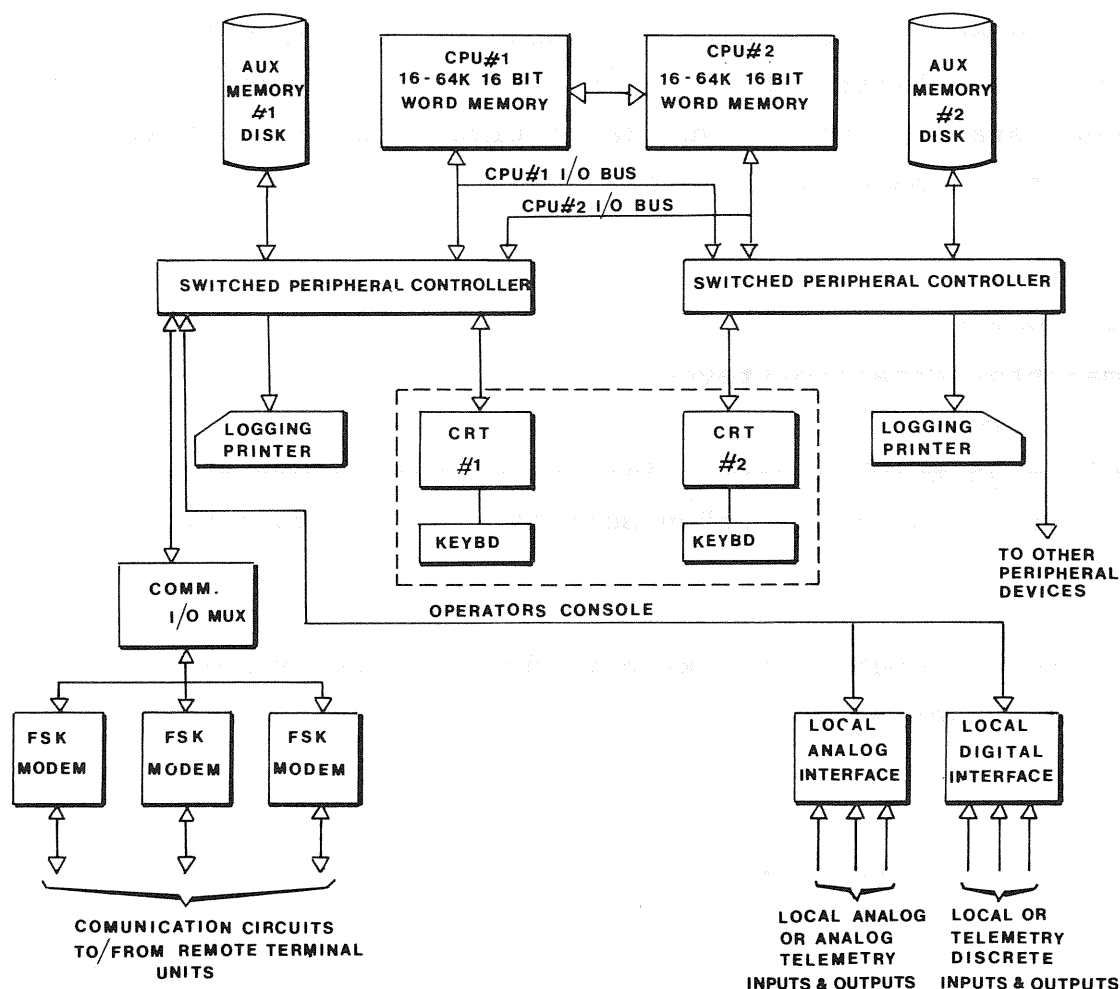
2.33 Käytettävien laitteistojen pääpiirteet

Edellisessä kappaleessa kuvatut säätöjärjestelyt voidaan toteuttaa useampien erilaisten laitteistojen avulla. Tietokoneella ohjattu nykyaikainen säätöjärjestelmä käsittää kuitenkin aina seuraavat pääosat:

- a. Keskusvalvomo, jossa on tietokonelaitteisto, näyttölaitteet, ohjauslaitteet sekä laitteet, joiden avulla käskyt siirretään keskusvalvomosta jakelujärjestelmän säätö- ja havaintopisteisiin.
- b. Kaukokäyttöasemat, joita voi olla useissa kohdissa jakelujärjestelmää, kuten pumppaamoissa, säiliöiden yhteydessä yms. Kaukokäyttöasemat on kytketty viestintäverkkoon sekä toisaalta antureihin ja säätimiin.
- c. Viestintäverkko, joka voi olla esim. vuokrattu puhelinlinja.

Seuraavassa on lyhyt selostus kustakin laitteiston pääosasta.

Keskusvalvomo: Vaikka nykyaikaisen prosessitietokoneen luotettavuus on hyvä, on kuitenkin toivottavaa, että käytetään kaksinkertaista laitteistoa. Toinen yksikkö huolehtii kenttätietojen keruusta, tietojen käsittelystä ja säädön suorituksesta ja toinen toimii erillisenä varayksikkönä, jolla voidaan suorittaa järjestelmän simulointia ja ohjelmien kehitystyötä. Tyypillinen sovellus tässä suhteessa on tietokone, jolla on 16 bitin sanapituus (nk. midi-tietokone) ja jolla on suhteellisen suuri lastentanopeus ja teho sekä joka on kustannuksiltaan kohtuullinen. Vaikka Assembler-kielellä ohjelmoidut minikoneet yleensä pystyvät suorittamaan kenttätietojen keruuseen ja käytön ohjaukseen liittyvät tehtävät, niin tehokaimmat midi-tietokoneet usein ovat parempia, koska niiden kapasiteetti riittää järjestelmän toiminnan luotettavuuden yms. tarkastelujen suorittamiseen. Esimerkki keskusvalvomon laitteistosta on kuvassa 4.



Kuva 4. Eräs keskusvalvomon laitteiston ratkaisumahdollisuus /11/.

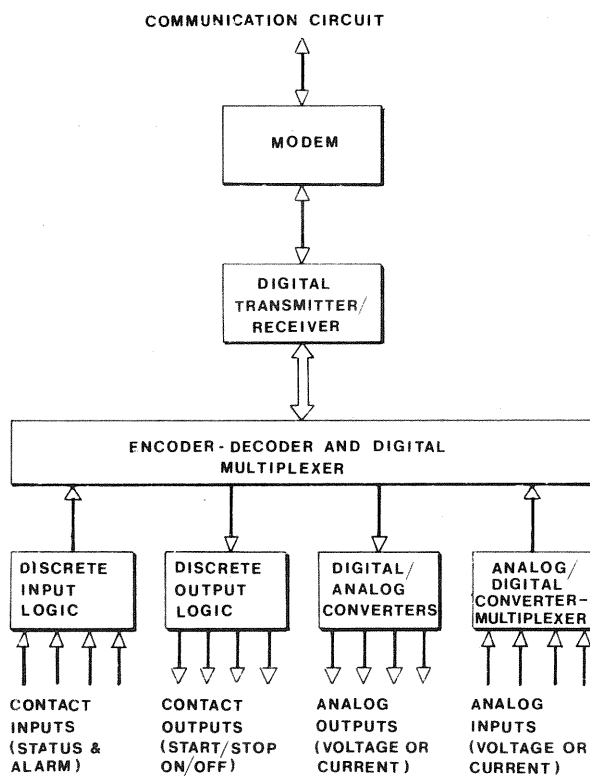
Kaukokäyttöasemat: Digitaaliset kaukokäyttöasemat keräävät tietoa määrävälein ja lähettävät keskusvalvomoon kaikki kerätyt tiedot. Keskusvalvomossa tietokone tarkistaa ja tulkitsee viestin. Kaukokäyttöasemat vastaanottavat käskyjä keskusvalvomosta ja suorittavat tämän antamia tehtäviä; lähettävät tietoja valvottavan elementin tilasta yms. ja suorittavat säätötoimia. Ennen lähetystä analogiset ja digitaaliset mittausravot muutetaan kaukokäyttöasemilla varmistetuiksi sarjamuotoisiksi digitaaliviesteiksi. Kuvassa 5 on esitetty digitaalisen kaukokäyttöaseman pääosat /20/.

Viestintäverkko: Viestintäverkon suunnittelu kenttätietojen ke-

ruuta ja käytön ohjausta varten riippuu paljon paikallisista olosuhteista kuten laitteistojen sijainnista ja linjojen käyttömahdollisuuksista sekä niiden vuokran suuruudesta. Seuraavassa on lueteltu eräitä mahdollisuuksia:

- kaapelit
- radiolinkit
- puhelinverkko
- voimajohtokantoaaltoyhteydet
- teleks-verkko
- puhelin- ja teleks-verkko niin, että keskusasema automaattisesti ottaa linjan käyttöön soittamalla haluttuun puhelinnumeroon

Kaikkia datasiirtomahdollisuuksia voidaan käyttää samassa verkossa lähes rajoituksetta /20/.



Kuva 5. Kaukokäyttöaseman pääosat /11/.

2.34 Sovellettavien ohjelmistojen tehtävät

Sovellettavien ohjelmistojen tehtävät voidaan ryhmitellä seuraavasti:

- reaaliajan asettamat vaatimukset
- kenttätietojen keruu
- tietojen käsittely
- tietojen tallennus
- tietokoneen ja ihmisen välinen tiedonsiirto

Reaaliaikajärjestelmässä on käyttöjärjestelmällä keskeinen osuus. Se huolehtii ajoituksesta, tietojen käsittelyjärjestyksestä sekä määrää muiden ohjelmamoduulien toimintaa. Valittaessa tietokone-laitteistoa on kiinnitettävä käyttöjärjestelmän tehokkuuteen yhtä paljon huomiota kuin itse laitteistoonkin.

Kenttätietojen keruun tarkoituksena on saada tietoja pumppaamoiden yms. kaukokäyttöasemilta sekä muista havaintopisteistä. Tähän liittyvän ohjelmiston tarkoituksena on kysyä tietoa näiltä asemilta viestiyhteyden välityksellä. Viestilinjan laadun mukaan tämä voidaan tehdä joko yksin- tai kaksinkertaisena viestityksenä. Kaukokäyttöasema lähettää vaaditut tiedot keskusvalvomoon yleensä varmennuskoodilla varustettuna. Ohjelmiston tehtävänä on tarkistaa tämä koodi, jotta voidaan olla varmoja viestin oikeellisuudesta. Jos tieto hyväksytään, siirretään tieto tietojenkäsittelyproses- siin jatkotoimia varten. Muutoin tietoa kysytään uudelleen.

Tietojen käsittelyyn liittyvän ohjelmiston avulla tiedot muutetaan haluttuun muotoon esim. metrisiin yksikköihin. Paineen suuruuden avulla voidaan laskea esim. jonkin säiliön vedenpinnan korkeus ja vesitilavuus, venturimittarin paine-eron avulla virtaama jne. Voidaan myös suorittaa hälytys, jos jokin arvo ylittää sille asetetut rajat. Tiedonkäsittelyohjelmistoon kuuluu jatkuvasti päivitettävä perustiedosto, jossa tarvittavat tiedot ovat.

Tallennusohjelmiston avulla perustiedoston tietoja tallennetaan

ja lajitellaan helposti luettavaan muotoon. Ohjelmistolle asetettavat vaatimukset riippuvat paljon lajiteltavan tiedon määrästä ja laadusta. Tietojen lajitteluohjelmistoon on sisällytetty yleensä ne toiminnot, joita ei voida toteuttaa helposti tietojen käsittelyprosessin yhteydessä kuten esim. keskiarvojen ja jakaumafunktioiden laskeminen. Tietojen käsittelyprosessin vaatimukset ovat paljolti tapauskohtaisia.

Käyttäjän ja tietokoneen välinen tiedonsiirto on perusedellytys jokaiselle prosessia ohjaavalle tietokoneelle. Nykyisissä järjestelyissä tämä on hoidettu yleensä kuvaputkien avulla. Tällöin käyttäjä saa joko automaattisesti tai halutessaan tietoja kentältä. Käytettävä ohjelmisto käsittelee tiedot helposti luettavaan muotoon perustiedoston ja tietojen käsittelyprosessin avulla.

2.35 Täysautomaattinen ohjaus

Tässä kappaleessa on kuvattu tarkemmin kappaleen 2.32 II - III-vaiheen mukaista säätöä.

Automaattisen ohjauksen soveltaminen mahdollistaa laskennollisten menetelmien käytön vedenjakelujärjestelmän ohjaukseen. Toisaalta tämä edellyttää reaaliaikaan perustuvien säätösääntöjen ja jakelujärjestelmän toimintaa kuvaavien matemaattisten mallien optimoinnin kehittämistä. Täysautomaattinen säätö ei tarkoita sitä, että käyttöhenkilöstön merkitys jäisi vähäiseksi. Automaattinen säätöjärjestelmä helpottaa käyttöhenkilöstön työtä. Järjestelmän seuranta on helpompaa ja käyttäjä saa suuntaviivoja valittaessa erilaisia säätötapoja, joiden avulla voidaan parantaa käyttövarmuutta ja käytön taloudellisuutta. Automaattisen ohjauksen soveltaminen edellyttää jakelujärjestelmän toiminnan ja säätösääntöjen merkityksen tuntemista.

2.351 Säädön tavoitteet

Jakelujärjestelmän pitää turvata veden saanti seuraavien 24...48

tunnin aikana, jolloin voi tulla kyseeseen kaksi toisistaan poikkeavaa käyttötilannetta. Toinen näistä on normaali käyttötilanne, jonka aikana vedenkulutus vaihtelee ennustettavissa olevien rajojen puitteissa. Tällöin kulutus tyydytetään sopivalla säiliöiden ja pumppaamojen käyttötavalla seuraavien 24...48 tunnin aikana. Toinen kyseeseen tuleva tapaus on epänormaali käyttötilanne kuten esim. sammutusveden otto tai putkirikon aiheuttama vuoto. Kummasakin tapauksessa säädön tavoitteet poikkeavat toisistaan.

Normaalitilanteessa säädön päätavoite on järjestelmän riittävä palvelutaso taloudellisin käyttökustannuksin. Palvelutasoon liittyvät seuraavat tekijät:

- solmupaineiden ja -virtaamien riittävä suuruus
- pieni todennäköisyys sille, että järjestelmän toiminta häiriintyisi oletettujen kulutusmuutosten vuoksi

Käytön taloudellisuuteen liittyvät seuraavat tekijät:

- parhaan pumppuyhdistelmän valinta kuhunkin kulutustilanteeseen
- vedenpuhdistuslaitosten tuoton ajoitus siten, että kulutuksen muutokset voidaan tyydyttää
- säiliötilavuuden hyväksikäyttö
- kokonaiskustannusten minimointi

Epänormaalissa käyttötilanteessa on tärkeää, että häiriö saadaan mahdollisimman nopeasti korjatuksi normaaliksi muun toiminnan siitä häiriintymättä.

2.352 Tietojen kokoaminen

Tietojen kokoamisprosessin tarkoituksena on antaa käyttöhenkilöstölle tarkkoja ja päivitettyjä tietoja järjestelmän nykyisestä ja oletetusta tulevasta tilasta, jotta säätö voidaan suorittaa mahdollisimman tehokkaasti. Osa tiedoista saadaan ON-LINE-tyyppisinä ja osa täytyy antaa järjestelmälle OFF-LINE-muotoisena. Tiedon kokoamisprosessissa voidaan erottaa seuraavat pääosat:

- verkon pelkistetty kuvaus

- kenttätietojen keruu
- kulutusennusteet
- järjestelmän nykyisen ja tulevan tilan määrittäminen
- epänormaalien kulutustilanteiden havaitseminen
- tulostus

Verkon kuvauksessa on otettava huomioon seuraavat seikat:

- alkuperäinen verkon rakenne
- perustiedot verkon parametreista, aikaisemmat kulutustiedot ja järjestelmän rajoitukset

Kuvauksen seuraavassa vaiheessa verkko pelkistetään edellä mainittujen tietojen avulla. Pelkistetyn verkon avulla pyritään kuvaamaan kenttäolosuhteet mahdollisimman tarkasti käyttäen kentältä saatuja reaaliaikaisia tietoja.

Kenttätietojen keruujärjestelmän tarkoituksena on hankkia tietoja niistä muuttujista, joiden avulla järjestelmän tila voidaan kuvata. Jotkut näistä muuttujista saadaan mittaamalla, mutta myös laskettuja arvoja käytetään. Muuttujina voivat olla solmujen painetiedot, säiliöiden vedenpinnan korkeudet, venttiilien asetusarvot, solmujen kulutukset jne. Kenttätietojen keruujärjestelmän täytyy olla yhtenevä pelkistetyn verkkomallin kanssa.

Kulutusennusteiden avulla arvioidaan jakelujärjestelmän kulutus seuraavien 24...48 tunnin aikana. Kulutus arvioidaan pelkistetyssä verkkomallissa esiintyville solmuille. Kulutusennusteet laaditaan kulutustyyppin, kyseisen ajankohdan, viikonpäivän ja aikaisempien kulutustietojen perusteella.

Vedenjakelujärjestelmän keskitetyn säädön yhteydessä tarvitaan tietoa järjestelmän arvioidusta käyttäytymisestä seuraavien 24 tunnin aikana. Tällöin oletetaan, että kulutus tunnetaan ja että noudatetaan jotain tiettyä säätötapaa. Keskusvalvomoon käyttöhenkilöstö arvioi järjestelmän tilan ja laatii ennusteen, joka perustuu mitattuihin arvoihin ja tehtyihin oletuksiin.

Järjestelmän nykytilan määrittämisessä ja ennusteen laadinnassa käytetään apuna laskenta-algoritmeja, jotka laskevat järjestelmän nykytilan perustuen seuraaviin tietoihin:

- järjestelmän muuttujien mittausarvot havaintopisteissä
- verkon matemaattinen esitystapa
- ennakkotiedot järjestelmän käyttäytymisestä perustuen aikaisempiin kulutustietoihin
- ennakkotiedot perustoimintamallista, joka koskee pumppuja, venttiilejä, säiliöitä jne.

Vedenjakelujärjestelmän nykytilan kuvauksen puutteena on usein käytettävissä olevien tietojen riittämättömyys, mikä johtuu riittämättömästä instrumentoinnista ja luotettavien ennakkotietojen saannista. Tämä merkitsee sitä, että osaa verkkoa ei voida kuvata. Toisaalta taas on tärkeää kuvata verkko siten, että se sopii yhteen pelkistetyin verkkomallin kanssa.

Verkossa tapahtunut häiriö kuten esim. pumppujen käyttöhäiriö, putkirikko, sammutusveden otto yms. vaatii nopeita säätötoimia. Tämä voidaan havaita varhaisvaiheessa, jos järjestelmän tilaa jatkuvasti seurataan ja suoritetaan tarkistuksia häiriötilan varalta.

Järjestelmän nykyisen ja ennakoitun tilan tulostus näyttölaitteille tai rivikirjoittimelle on tietojen käsittelyprosessin viimeinen vaihe. Tulostettujen tietojen perusteella käyttäjä voi arvioida säätötarvetta sekä tarvittaessa suorittaa aikaisempaan käyttökokeeseen perustuvia säätötoimia. Tällöin on kyseessä kohdassa 2.32 kuvatus II-vaiheen mukainen ohjaus.

2.353 Säätösääntöjen kehittäminen

Siirryttäessä tietokoneen avulla tapahtuvaan täysautomaattiseen ohjaukseen on seuraavana vaiheena säätösääntöjen määrittäminen. Tarkoituksena on kehittää säätösäännöt normaalia ja epänormaalia käyttötilannetta varten.

Normaalikäytössä säätösäännöt perustuvat pumppujen taloudelliseen käyttöön sekä säiliötilan, vedenottamoiden ja mahdollisesti ostetun veden käyttöön.

Edellä kuvatuslaista säätösääntöjen määrittästä on tarkemmin selostettu luvussa 3 eikä siihen enää puututa tässä yhteydessä.

Epänormaalissa käyttötilanteessa voidaan erottaa kolme erilaista tapausta:

Ehkäisevä muoto: Tässä tapauksessa käyttäjä voi ennakolta olettaa jonkin epätavallisen käyttötilanteen syntyneen ja tutkimalla verkoston käyttäytymistä tässä hypoteettisessa tilanteessa hän voi päätellä mahdollisuuksia haittojen vähentämiseksi esim. hakemalla tilanteeseen sopivia säätösääntöjä.

Hätätilanne: Jos jakelujärjestelmässä on sattunut jokin hätätilanne eikä riittävää palvelutasoa voida ylläpitää, niin pyritään minimoimaan haitan vaikutukset. Järjestelmän taloudellinen toiminta ei ole enää tällöin ohjauksen tavoitteena.

Palauttava säätö: Palauttavan säädön avulla yritetään järjestelmän tila palauttaa mahdollisimman nopeasti normaaliksi.

2.354 Jakelujärjestelmän simulointi

Kehittyneen säätöjärjestelmän käyttöönoton ohella tarvitaan myös mahdollisuus tutkia verkoston käyttäytymistä erillisen simuloinnin avulla. Simuloimalla voidaan tutkia erilaisten säätösääntöjen vaikutusta ennen kuin ne otetaan käyttöön. WATSIM 2 on tämäntyyppinen simulointiohjelma. Järjestelmän toimintaa voidaan simuloida sen avulla 24...36 tunnin ajan. Näin voidaan tutkia säiliötilan erilaisia käyttötapoja, vedenpuhdistuslaitosten tuoton vaikutusta ja järjestelmän energiataloutta. Tulosten avulla laaditaan säätösääntöjä erilaisia käyttötilanteita varten.

2.355 Täysautomaattisen optimaalisen säädön toteuttaminen

Seuraavassa on lyhyesti esitetty ne vaatimukset, jotka täysautomaattisen säädön käyttöönotto edellyttää laitteistolta ja ohjelmistolta. Osa niistä (kohdat 3...5) on mainittu muualla tekstissä eikä niitä ole tässä lähemmin selostettu ja osaa (kohdat 6 ja 7) ei ole vielä perusteellisesti selvitetty /8/.

1. Riittävän nopea mahdollisuus järjestelmän simulointiin, jotta kenttäolosuhteiden muutosten vaikutukset saadaan ajoissa selville. Simulointi voidaan suorittaa erillisenä, joskin reaaliaikainen simulointi lienee parempi ratkaisu. Tämä voidaan tehdä jos jakeluverkko on pelkistetty.
2. Jakelujärjestelmän pelkistäminen. Pelkistetyn jakeluverkon tulee olla hydraulisesti yhtenevä alkuperäisen kanssa. Sen tulee olla mahdollisimman yksinkertainen, jotta reaaliaikainen tarkastelu olisi mahdollinen eikä tietokoneen kapasiteettia ylitettäisi.
3. Kulutusennusteet seuraavaa 24...48 tuntia varten.
4. Pumppujen taloudellinen käyttö. Tätä kohtaa on lähemmin selostettu luvussa 3.
5. Mitattuihin arvoihin perustuva järjestelmän nykytilan arviointi. Lähemmin kohdassa 2.352.
6. Käytettyjen säätötapojen herkkyysanalyysi. Herkkyysanalyysin tarkoituksena on selvittää käytettyjen säätötapojen vaikutuksen laajuus järjestelmän toimintaan.
7. Edellä mainittujen kuuden kohdan yhdistäminen yhdeksi toimivaksi kokonaisuudeksi.

2.36 Avoimia kysymyksiä

Edellä kuvatunlainen automaattinen valvonta ja ohjaus on vielä Suomessa kehityksensä alussa, joten avoimia kysymyksiä on hyvin runsaasti lähes koko alueelta. Näitä ovat mm.:

- ohjauksen kehittämistä ajatellen riittävän kattavan käyttötarkkailu- ja ohjausjärjestelmien laitteistokysymykset
- laitteistojen sijoitustarve, johon liittyy myös pelkistämistekniikka
- ohjaustapojen yleiset vaatimukset ja yleinen soveltuvuus
- säätöön soveltuvien ohjelmistojen kehittäminen (toiminnan simulointi ja säädön optimointi)
- säätöön soveltuva kulutusennustemetodiikka
- järjestelmän tilan arviointi käyttötilanteen perusteella

Menestyksellisten ohjaus- ja käyttötarkkailujärjestelmien kehittäminen edellyttää kaikkien mainittujen kysymysten tyydyttävää selvittämistä.

3. KOLMIOSAINEN, HIERARKINEN OHJAUKSEN OPTIMOINTIIN SOVELTUVA MALLI

Tämä luku noudattaa lähteen /10/ mukaista esitystä. Tässä yhteydessä on selostettu vain yksi lähestymistapa kyseiseen ongelmaan. Luvussa luodaan katsaus ongelman laajuuteen ja esitetään mahdollisuuksia sen ratkaisuun.

Vedenjakelujärjestelmien koon kasvaessa ja rakenteen monimutkaisuudessa on tärkeää, että voidaan säästää pumppauskustannuksissa ja käyttää vesivaroja entistä tehokkaammin. Käytön ja valvonnan suunnittelun tarkoituksena on mahdollistaa nämä kaksi vaatimusta taloudellisten ja palvelutason asettamien rajoitusten puitteissa. Raportin tässä osassa kuvataan kolmiosainen hierarkkinen malli, jonka avulla voidaan suunnitella vedenjakelujärjestelmän käyttötapoja ja ohjausta. Nämä kolme osaa sisältävät kukin optimointimallin seuraavasti:

- a. Kuukausimalli, suunnitteluaikajaksona yksi vuosi
- b. Vuorokausimalli, suunnitteluaikajaksona yksi kuukausi
- c. Tuntimalli, suunnitteluaikajaksona yksi vuorokausi.

Kuukausi-, vuorokausi- ja tuntioptimointi muodostavat toiminnallisen hierarkian. Jokainen osa antaa tuloksena vedenpuhdistamojen ja/tai pumppujen käyttösuunnitelman siten, että tulos on yksityiskohtaisempi edellisen osan antamiin tuloksiin verrattuna. Ylemmän tason optimaaliset, pitkän ajanjakson käyttösuunnitelmat ja niiden käyttökustannukset voidaan antaa alkuarvoina seuraavaksi alemman tason optimointimallille. Pitkän ajan vaikutukset tulevat näin huomioon otetuiksi alemman tason mallissa.

Kuukausi- ja vuorokausimalli antavat suuntaviivoja tuntimallille tämän määrittäessä pumppujen tai vedenottamoiden käytön ohjausarvoja. Jokaista mallia voi käyttää sellaisenaan vedenjakelujärjestelmän toiminnan suunnitteluun. Esim. vuorokausimalli voi olla hyödyllinen arvioitaessa pumppujen huollon ajoitusta.

Tässä kappaleessa on kuvattu pääpiirteissään kuukausi-, vuorokausi- ja tuntimalli sekä tarkasteltu niiden toimintaa yhdessä.

3.1 Kuukausimalli

Kuukausimallilla suoritetaan suunnittelulaskelmat kerran kuukaudesta.

Kuukausimallin avulla suunnitellaan vedenottamoiden käyttö kuukauden jaksoissa vuoden ajaksi. Vedenjakelujärjestelmässä voi olla seuraavia veden hankintamahdollisuuksia:

- a. pintavesi ja tekoaltaat
- b. pohjavesi
- c. veden osto muilta vesilaitoksilta

Tavoitteena on määrittää mainittujen vesilähteiden kuukausikäyttö siten, että niiden vuotuiset käyttökustannukset ovat minimissään.

Kuukauden asemesta mallin tässä osassa voitaisiin käyttää myös viikkoa.

3.11 Kuukausimallin yleispiirteet

Jakelujärjestelmä kuvataan vedenottamoiden ja kulutussolmujen avulla, jotka ovat kytketty toisiinsa vedenkäsittelylaitosten ja pumpaamojen välityksellä. Kulutukset ja vedenottamoiden käytettävissä oleva vesimäärä kuvataan kuukausiennusteiden avulla. Vedenottamoiden veden käyttökelpoisuuteen vaikuttavat monet tekijät, esimerkiksi virtaamat tekoaltaisiin sekä pintavedenottamoiden antoisuudet ovat hydrologisia tekijöitä (sademäärä, valunta jne.). Veden ostosopimuksissa on yleensä ehtona, että vettä ostetaan kuukausittain tietty kiinteä määrä ja päivittäinen minimi on määrätty. Pohjavedenottamoiden antoisuus riippuu niiden hydrologisista tekijöistä sekä pohja- ja pintavesiolojen keskinäisestä vuorovaikutuksesta.

Mallin pääosat ovat seuraavanlaisia:

- a. Määritetään ko. kuukautena käytettävän ja seuraavana kuukautena käytettävissä olevan vesimäärän välinen matemaattinen yhteys. Jos esimerkiksi mallin yhteydessä määritetään sääntöjä pohjaveden otolle, niin mallissa pitää myös ottaa huomioon kyseisen pohjavesilähteen käytön vaikutus lähteen antoisuuteen.
- b. Määritetään kulutuksen ja vedenottamoiden antoisuuden tilastolliset parametrit.
- c. Kehitetään malli, joka määrittää vedenottamoiden optimaaliset käyttöohjeet perustuen matemaattisiin yhtälöihin (a) ja kulutuksen tilastollisiin tekijöihin (b).

3.12 Kuukausimallille annettavat alkuarvot

Kuukausimalli tarvitsee seuraavat tiedot alkuarvoina:

a. Energia- ja vesisopimukset

Nämä sopimukset perustuvat pitkän aikavälin suunnitelmiin. Myös sopimusehtojen vaikutus kuukausimalliin otetaan huomioon.

b. Tiedot edellisten aikajaksojen toiminnasta

Nämä tiedot perustuvat järjestelmän toimintaan aikaisempien kuukausien aikana ja vedenottamoiden antoisuuksien muuttumiseen. Muut käyttötiedot käsittävät vedenpuhdistuslaitosten käyttökapasiteetin sekä niiden käyttökustannukset, pohjavesivarojen uusiutumisen, lasketut pumppauskustannukset sekä vedenottamoiden käytöstä aiheutuvat kustannukset.

c. Vedenottamoiden antoisuuden ennustaminen

Jokaisen vedenottamon kuukausittaiset antoisuusennusteet pitää olla käytettävissä samoin kuin tiedot pohjavesilähteiden vedenpinnan alenemisesta pumppauksen vaikutuksesta.

d. Aikaisempiin kulutustietoihin ja sosiaalis-taloudellisiin tietoihin perustuvat kulutusennusteet

On huomattava, että sekä vedenottamoiden antoisuudet että kulutusennusteet ovat yleensä arvioita, joilla on hajonta keskiarvon suhteen. Tämä hajonta voidaan myös antaa mallille alkuarvona, jos sen katsotaan vaikuttavan lopputulokseen.

3.13 Kuukausimallin antamat tulokset

Mallin avulla voidaan määrittää kolmea eri tyyppiä olevaa tulosta.

- a. Jokaisen kuukauden arvioitu vedenottamoiden ja pumppaamojen käyttösuunnitelma ja arvioitu kustannus, joka aiheutuu jos käyttösuunnitelmaa ja/tai sopimuksia ei voida noudattaa.
- b. Vuoden jäljellä olevien kuukausien kuukausittaiset käyttökustannukset.
- c. Saatujen kustannusten muutosalttius sopimusehtojen muutosten suhteen.

3.2 Vuorokausimalli

Vuorokausimallille annetaan alkuarvoina kuukausimallin antamat kunkin vedenottamon käyttösuunnitelmat. Vuorokausimallin avulla on tarkoitus määrittää kunkin pumppaamon vuorokautinen käyttösuunnitelma siten, että kokonaiskäyttökustannukset ovat minimissään. Laskualgoritmin avulla määritetään optimaalinen käyttöstrategia siten, että kaikki vedenottamoihin, kulutuksiin ja vesisäiliöihin liittyvät rajoitukset on otettu huomioon.

3.21 Vuorokausimallin yleispiirteet

Jakelujärjestelmä kuvataan pumppaamojen, kulutuspisteiden sekä ylävesisäiliöiden avulla. Jakeluverkko yksinkertaistetaan siten, että ainoastaan tärkeimmät yhteydet on otettu huomioon. Nämä voidaan

määrittää esim. WATSIM 2 simulointimallin avulla. Simuloinnin tuloksista voidaan myös määrittää suoraan kulutukseen menevän ja säiliöitä täyttävän pumppauksen osuus kunakin ajanjaksona.

Mallin matemaattinen esutystapa voidaan laatia siten, että mallissa voi olla mukana mielivaltaisen määrä kulutussolmuja, pumppaamoita ja vesisäiliöitä. Mallissa voidaan asettaa rajoituksia pumppujen tuotolle sekä virtaamille vesisäiliöstä samoin kuin säiliöiden ja pumppujen kokonaiskäytölle. Optimointi edellyttää, että mallin kohdefunktio on konkaavi ja että rajoitusfunktiot ovat lineaarisia.

3.22 Vuorokausimallille annettavat alkuarvot

Kuukausimalli määrittää optimaalisesta käytöstä aiheutuvat kustannukset pitkän ajanjakson aikana. Kustannuksiin vaikuttavat vedenottamoiden käyttötapa sekä veden oston sopimusehdot. Nämä kustannustiedot sekä tiedot pumppaamojen käytettävissä olevasta vesimäärästä annetaan alkuarvoina vuorokausimallille, joka määrittää vuorokautisen optimaalisen käyttötavan. Kustakin vuorokaudesta täytyy antaa seuraavat tiedot alkuarvoina:

- a. Kulutustiedot: kunkin vuorokauden kulutus saadaan kulutusennusteesta.
- b. Tiedot energian toimitussopimuksista.
- c. Edellisten ajanjaksojen käyttötiedot. Nämä tiedot perustuvat järjestelmän toimintaan nykyhetkellä ja sisältävät seuraavia asioita:
 - pumppujen käyttö ja niiden käytön kustannus perustuen järjestelmän nykytilanteeseen
 - pumppaamoista lähtevän, suoraan kulutukseen menevän ja säiliöiden käyttöön kuluva vesimäärän suhde kunakin hetkenä
 - ylävesisäiliöiden vedenpinnankorkeudet
 - tiedot kunkin pumppaamon pumppujen käytettävyydestä

3.23 Vuorokausimallin antamat tulokset

Mallin avulla voidaan määrittää kolmenlaisia tuloksia:

- a. Arviot kunkin pumppaamon tuottamasta vuorokautisesta vesimäärästä sekä säiliöiden vedenpinnan korkeuksista.
- b. Järjestelmän toiminnan optimaaliset kustannukset kuukauden jäljellä olevien päivien aikana.
- c. Vedenottamoiden antoisuuden väheneminen ja niihin liittyvät kokonaiskustannukset.

3.3 Tuntimalli

Tuntimallin alkuarvona on vuorokausimallin antama, kunkin pumppaamon tuottama päivittäinen vesimäärä. Tarkoituksena on määrittää tuntimallin avulla pumppujen käyttö siten, että kustannukset ovat minimissään. Kulutus täytyy tyydyttää siten, että energian maksimitehoarvoa ei ylitetä. Tuntimalli voidaan suunnitella siten, että tulokseksi saadaan pumppujen asetuservot, jotka voidaan antaa järjestelmää ohjaavalle tietokoneelle alkuarvoina.

3.31 Tuntimallin yleispiirteet

Tuntimallin yhteydessä käytetään jakeluverkoston pelkistettyä muotoa. Pelkistämisen tekniikkaa on käsitelty lähemmin lähteessä /10/. Mallissa otetaan huomioon 'aktiiviset' solmut esim. pumput ja vesisäiliöt. 'Passiivisia' solmuja ovat esim. kulutussolmut. Verkoston pelkistetyssä muodossa kulutussolmut on ryhmitelty siten, että yksi solmu vastaa useampaa todellista solmua. Näin menetellen saadaan mallin laskennallinen puoli yksinkertaisemmaksi.

Kunkin vuorokauden kulutusennuste annetaan tunnin välein. Ennuste perustuu aikaisempiin kulutustietoihin sekä senhetkisiin sääoloihin. Käytön taloudellisuus riippuu siitä, koska vesisäiliöitä täy-

tetään ja koska niitä käytetään kulutuksen tasaukseen. Tämä merkitsee sitä, että pumppauksessa täytyy etukäteen ottaa huomioon ennustettu kulutuksen muutos. Mallille täytyy asettaa seuraavat rajoitukset:

- a. Järjestelmän kulutukset täytyy tyydyttää ja verkon pitää toimia hydraulisesti.
- b. Kaikilla pumppaamoilla, vesisäiliöillä, vedenpuhdistamoilla ja moottoriventtiileillä tulee olla hyväksyttävät toimintapisteet.
- c. Järjestelmän pumppujen käyttötavan pitää olla sellainen, että energian ostosopimuksessa mainittua energian kulutuksen tehokuippua ei ylitetä ilman pakottavaa tarvetta.

3.32 Tuntimallille annettavat alkuarvot

Vuorokausimallista saadaan säiliöiden vedenpinnan korkeusvaihteluiden ja vuorokautisen pumppauskustannuksen tavoitearvot. Kaikki alkuarvot esim. kulutusennusteet täytyy antaa tunnin välein. Myös ajat, jolloin pumput eivät ole käytettävissä, annetaan alkuarvoina. Muut tuntimallin tarvitsemat alkuarvot ovat seuraavia:

- a. Tiedot jakeluverkosta (pelkistetty) ja pumppukäyristä. Tiedot vesisäiliöistä, venttiileistä ja muista verkon laitteista sekä laitteiden maksimivirtaamista ja pumppujen käytön rajoituksista.
- b. Käyttötiedot, jotka sisältävät tiedot kunkin pumppuyksikön toiminnasta sekä energian hinnan määritysperiaatteista.
- c. Pitkän ajanjakson käyttösuunnitelma, joka sisältää pumppujen ja säiliöiden käyttötavat sekä arvioidut kustannukset, jos kyseistä käyttötapaa ei voida noudattaa.

3.33 Tuntimallin antamat tulokset

Mallin avulla voidaan määrittää seuraavanlaisia tuloksia:

- a. Tulokseksi saadaan pumppuyhdistelmien, vedenottamoiden jne. taloudelliset käyttötavat, kun verkostoa kuormitetaan tietyllä tavalla. Tulokseksi saadaan edelleen pumppujen katkaisurajat säiliöiden vedenpintojen, paineolojen ja virtaustietojen funktiona.
- b. Tulokseksi saadaan myös virtaussuhteet vedenottamoiden, kulu-
tuspisteiden ja ylävesisäiliöiden välillä.
- c. Edelleen tulokseksi saadaan käytön kokonaiskustannukset, jotka muodostuvat vedenottamoiden, puhdistamoiden ja pumppaamojen käytöstä.

3.4 Mallien keskinäinen käyttö

Ylemmän asteen malli määrittää kunkin vedenottamon käyttötavan olettaen, että alemman asteen malli käyttää mainittuja määritettyjä vesimääriä optimaalisesti. Suorittamalla laskelmat tällä tavalla varmistutaan siitä, että minimikäyttökustannukset kyseiseksi vuodeksi voidaan määrittää, koska alemman asteen malli tavallaan hajottaa pienempiin osiin ylemmän mallin antaman tuloksen.

Alemman asteen malli, esim. tuntimalli, valitsee tavoitearvoiksi ne arvot, jotka vuorokausimalli on antanut optimaalisina.

Tiedot järjestelmän nykyisestä toiminnasta mukaanluettuna pumppauskustannukset ja tiedot vedenottamoiden vedentoimituskyvyn vähenemisestä vuorokauden aikana syötetään takaisin vuorokausimalliin. Näitä tietoja voidaan käyttää päivitettäessä vuorokausimallia ja uudelleen määritettäessä lopullisia vesisäiliöiden käytöstä aiheutuneita kustannuksia.

Kolmiosaisen mallin kiinnostavana piirteenä onkin, että se saate-
taan ajan tasalle toimintansa yhteydessä. Esim. vuorokausimalli
päivitetään käyttämällä tietoja järjestelmän nykyisestä toiminnas-
ta. Samoin päivitetään kuukausimalli edellisten kuukausien tieto-
jen avulla. Kuukausimallin päivytyksestä saadaan lisäksi arvokas-
ta tietoa järjestelmän pitkäaikaisen toiminnan suunnitteluun, mis-
tä puolestaan saadaan merkittäviä tietoja sopimusneuvotteluja var-
ten (esim. energia- ja vedentoimitussopimukset).

Mallien ratkaisuihin on useita laskennollisia menetelmiä. Opti-
mointitehtävät on mahdollista ratkaista tehokkaasti dynaamisella
ohjelmoinnilla tai matemaattisen ohjelmoinnin menetelmin kuten
esim. lineaarista tai epälineaarista ohjelmointia käyttäen. Rat-
kaisutekniikan valintaan vaikuttavat suuresti ongelman luonteen-
omaiset piirteet sekä käytettävissä oleva laskentakapasiteetti.
Kuvattujen mallien yhteydessä dynaaminen ohjelmointi sopii kuu-
kausi- ja tuntimallin ratkaisuun. Vuorokausimallille sopii jokin
muu algoritmi esim. lineaarinen optimointi. Mainittakoon, että
nämä ratkaisutekniikat saattavat olla käytännössä hyvinkin hanka-
lia toteutettavia.

3.5 Yhteenveto

Edellä esitettyä kolmiosaista mallia voidaan soveltaa kaikkiin ve-
denjakelujärjestelmiin. Optimointitehtävien ratkaisun vaikeusaste
riippuu tutkittavasta jakelujärjestelmästä.

Kuukausimallin antamat käyttöohjeet mahdollistavat jakelujärjes-
telmän käytön siten, että diskontatut, odotettavissa olevat kus-
tannukset ovat pienimmillään.

Vuorokausimallin toiminta riippuu suoraan kulutuksen pumpattavan
ja säiliöitä täyttävän vesimäärän keskinäisestä suhteesta. Jois-
sakin jakelujärjestelmissä vesi pumpataan aina ylävesisäiliöön ei-
kä suoraan kulutukseen mene ollenkaan vettä. Toisaalta voidaan
myös käyttää pumppuja, joiden kierrosnopeutta voidaan säätää, ei-

kä ylävesisäiliötä silloin välttämättä tarvita. Joka tapauksessa päivittäinen käyttösuunnitelma riippuu energian myyntisopimuksesta ja vuorokausimallin avulla voidaan arvioida vuorokautista vedenottoista saatavaa vesimäärää, huollon tarvetta ja veden kulutuskuvioiden vaihtelun vaikutusta viikon eri päivinä.

Tuntimallin tarkoituksena on suunnitella pumppauksen käyttötapa perustuen tunneittain annettuun kulutusennusteeseen ja jakeluverkon pelkistettyyn kuvaamiseen. Pumppujen käyttösuunnitelmaan vaikuttavat energian sallittu maksimiteho sekä pumppujen käytöstä aiheutuvat rajoitukset. Myös pumppaamojen yksilölliset piirteet vaikuttavat niiden ohjaukseen. Tuntimallin ratkaisun numeerinen puoli on hyvin paljon riippuvainen kyseisen verkon pelkistämisestä.

4. TUUSULAN SEUDUN VESILAITOS

4.1 Johdanto

Tuusulan Seudun Vesilaitoksen (TSV) jakelualue käsittää Järvenpään ja Keravan kaupunkien sekä Tuusulan kunnan alueet. Tarkasteltuun Tuusulan kunnan alueeseen kuuluu lähinnä Hyrylän osa-alue. Osakaskuntien vesijohtoverkot toimivat omina painepiireinään. Järvenpää ja Hyrylä pystyvät tyydyttämään vedenkulutuksensa niiden vedenottamoiden avulla, jotka pumpaavat suoraan kyseisiin painepiireihin. Keravan ainoa ottamo sijaitsee Hyrylässä ja tyydyttää vain osaksi Keravan vedentarpeen. Loppu vesi saadaan Järvenpään ja Hyrylän verkostojen kautta.

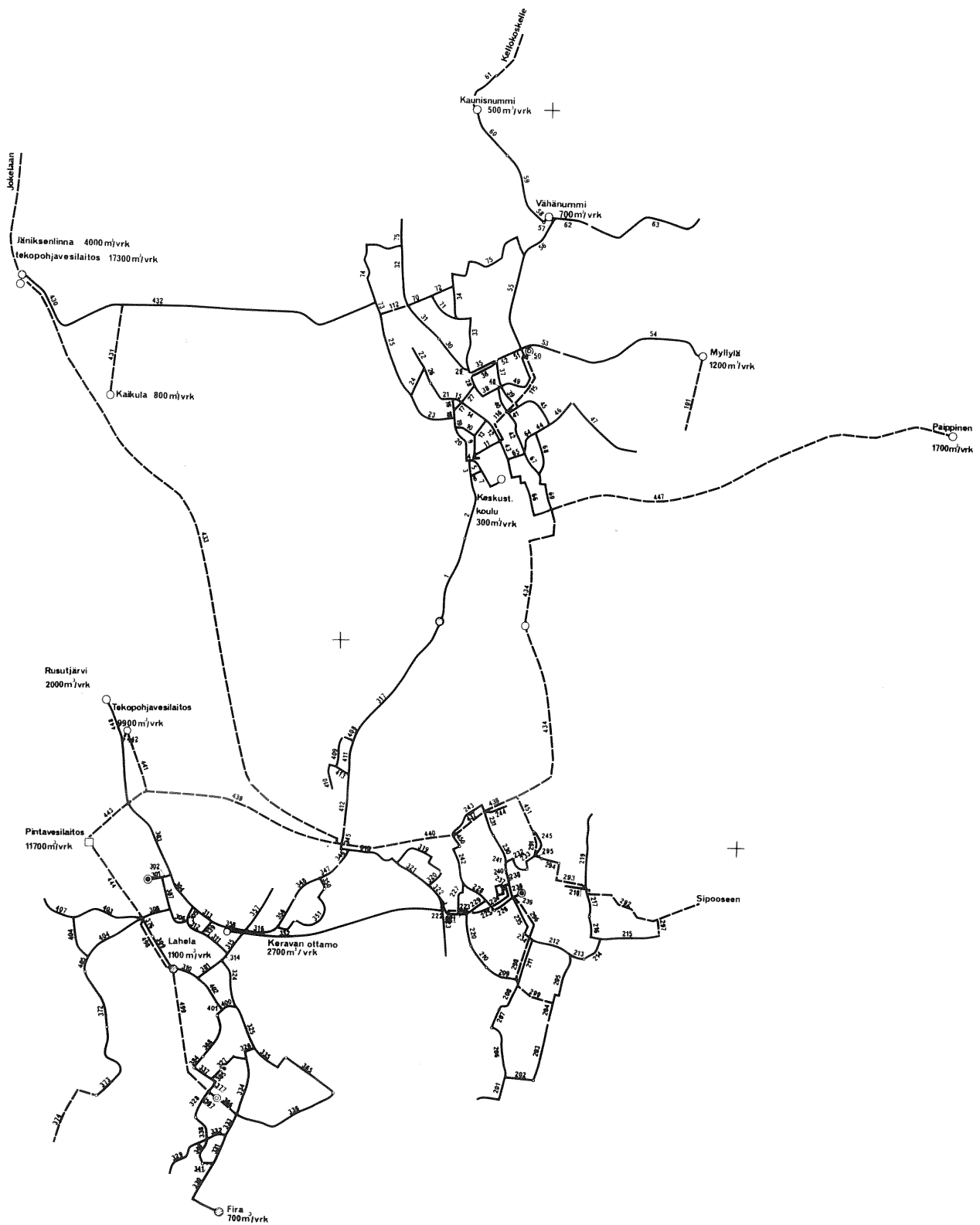
Vesilaitoksen vedenjakelujärjestelmän ohjausmahdollisuudet ovat nykyisellään erinomaiset. Ensisijaisen mielenkiinnon kohteina ovat olleet järjestelmän energian kulutuksen kannalta taloudellisen ohjauksen tutkiminen sekä rakennettavien uusien yhteyksien ja laitosten ohjaus siten, ettei järjestelmän toiminnan luotettavuus laske. Jälkimmäiseen kysymykseen on oleellisesti liittynyt nykyisen säiliökapasiteetin riittävyyden määrittäminen.

Sen enempää järjestelmän ohjauksen taloudellisuutta kuin järjestelmän varmuuttakaan ei voida tähän asti käytetyllä metodiikalla yksiselitteisesti optimoida. Soveltuvaa ratkaisua on haettu vuorokausisimuloinnilla (WATSIM 2), jonka avulla löydetään halutun lopputuloksen edellyttämät toimet.

4.2 Tuusulan Seudun Vesilaitoksen vedenjakelujärjestelmän kuvaus

4.21 Verkon kuvaus

Järvenpään, jonka keskimääräinen vedenkulutus v. 1974 oli $5\,000\text{ m}^3/\text{vrk}$, $2\,000\text{ m}^3$:n ylävesisäiliö (solmu 40) sijaitsee jakeluverkon keskellä (kuva 6). Verkkoon syöttää vettä viisi pohjavedenottamo:



Kuva 6. TSV:n jakelujärjestelmä.

Kaunisnummi $500 \text{ m}^3/\text{vrk}$ (solmu 43), Vähänummi $700 \text{ m}^3/\text{vrk}$ (solmu 46), Myllylä $1\,200 \text{ m}^3/\text{vrk}$ (solmu 43), Keskuskoulu $300 \text{ m}^3/\text{vrk}$ (solmu 7) ja Jäniksenlinna $4\,000 \text{ m}^3/\text{vrk}$ (solmu 430) eli keskimääräinen antoisuus yhteensä $6\,700 \text{ m}^3/\text{vrk}$.

Keravan keskimääräinen vedenkulutus oli v. 1974 $5\,400 \text{ m}^3/\text{vrk}$. Jakeluverkon keskellä sijaitsee sekä $1\,000 \text{ m}^3$:n ylävesisäiliö (solmu 239) että $3\,600 \text{ m}^3$:n alavesisäiliö (solmu 236). Keravan $2\,700 \text{ m}^3/\text{vrk}$ tuottava ottamo sijaitsee Hyrylässä. Tutkimuksen kestäessä ottamo pumppasi korkeapainepumpuilla Keravan verkkoon, mutta vuoden loppuun mennessä oli tarkoitus aloittaa pumppaaminen matalapainejohtoa pitkin Keravan alavesisäiliöön. Keravan keskusta-alueen johtojen reservikapasiteetti on huomattavan pieni.

Hyrylän osuus Tuusulan koko kulutuksesta oli v. 1974 $1\,600 \text{ m}^3/\text{vrk}$. $1\,000 \text{ m}^3$:n ylävesisäiliö (solmu 308) sijaitsee verkon luoteisosassa. Rusutjärven ottamo syöttää pohjoissuunnalta verkkoon $2\,000 \text{ m}^3/\text{vrk}$ (solmu 326), etelästä syöttää Lahelan ottamo $1\,100 \text{ m}^3/\text{vrk}$ (solmu 301) ja Firan ottamo $700 \text{ m}^3/\text{vrk}$ (solmu 324). Ottamoiden keskimääräinen antoisuus on siis yhteensä $3\,800 \text{ m}^3/\text{vrk}$.

Järvenpään ja Tuusulan rajalla toimii paineenkorotuspumppu, jonka keskimääräinen nostokorkeus on 23 m ja pumppaussuunta Tuusulaan (solmusta 1 solmuun 325). Keravan ja Tuusulan rajalla olevan moottoriventtiilin (solmusta 323 solmuun 222) avulla säädetään Keravan lisävedenhankintaa Järvenpään ja Keravan verkoista.

Paineenkorotuspumpulla ja moottoriventtiilillä taajamakohtaiset verkot sulkeutuvat omiksi painepiireiksi. Verkkojen toimintaa säätelevien ylävesisäiliöiden HW:t ovat seuraavat: Järvenpää 105 m, Kerava 97 m ja Hyrylä 110 m. Vesisäiliöiden pohjien tasot ovat vastaavassa järjestyksessä 94 m, 85,5 m ja 103 m.

4.22 Nykyiset säätöjärjestelyt

TSV:n vedenjakelujärjestelmän ohjauksen nykyiset säätömenetelmät

perustuvat järjestelmän luotettavuuden maksimoimiseen. Vesisäiliöiden täyttöasteet ovat jatkuvasti palovesi- ym. varausten edellyttämää tasoa suuremmat. Vesisäiliöiden mukaan ohjattavien elementtien säätöarvot (katkaisu- ja käynnistysrajat) ovat selvästi lähempänä HW:tä kuin NW:tä.

Järvenpään pohjavedenottamoista Myllylä ja Keskuskoulu toimivat jatkuvasti, Kaunisnummi aikasäätöisesti osan vuorokautta sekä Vähänummi ja Jäniksenlinna painesäätöisesti eli Järvenpään ylävesisäiliön vedenpinnan tason ohjaamana. Jäniksenlinnan ottamon käynnistysrajat muuttuvat sen mukaan onko paineenkorotuspumppu toiminnassa vai ei.

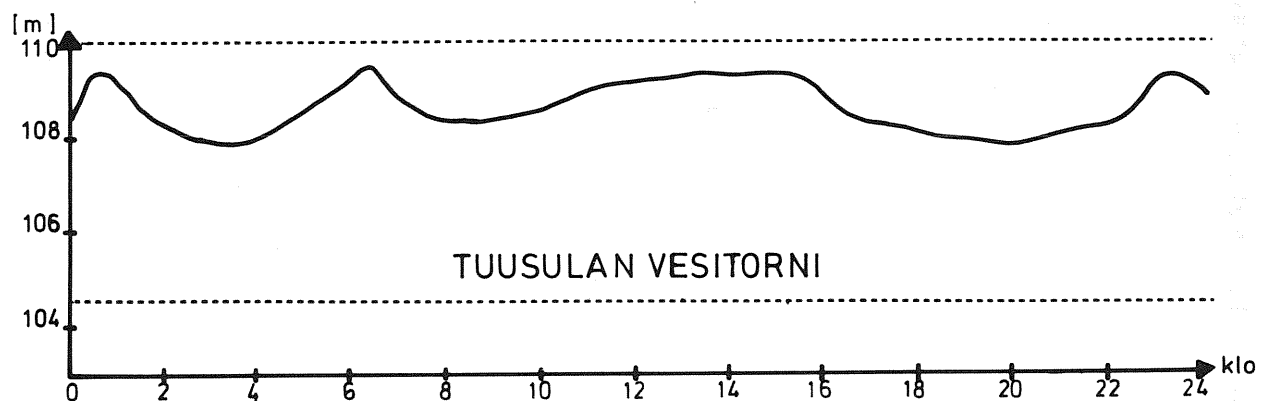
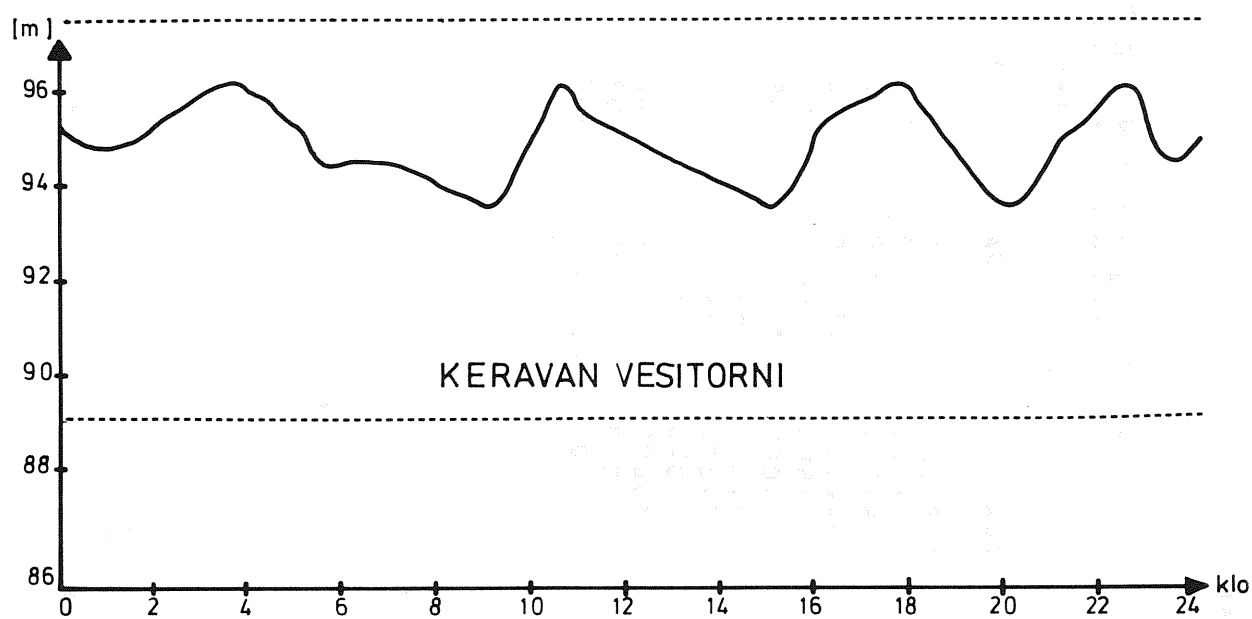
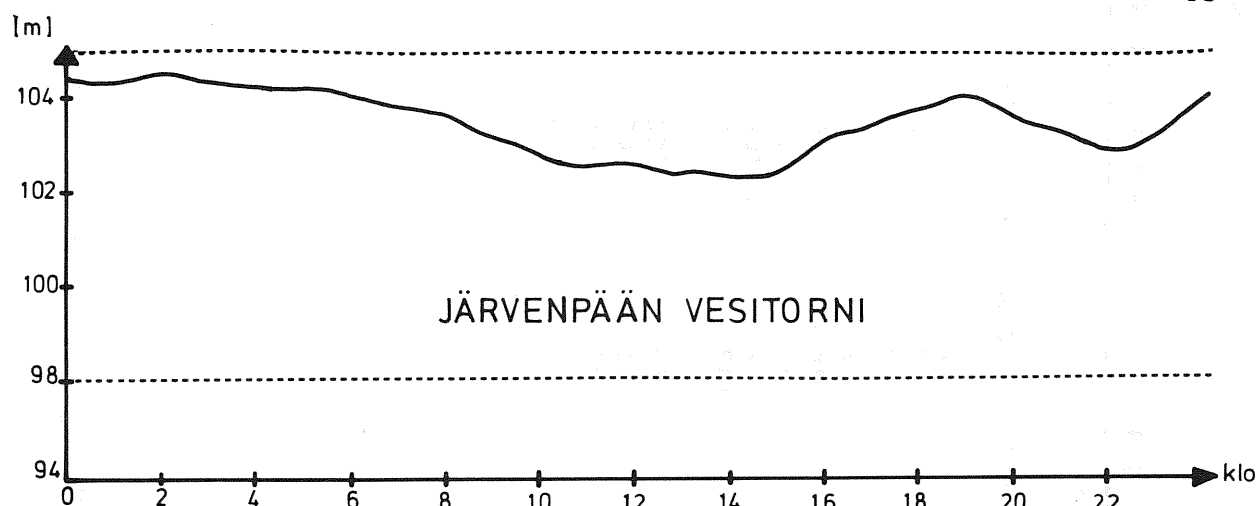
Keravan ottamoa tulee ohjaamaan alavesisäiliön vedenpinnan taso. Alavesisäiliön pumppuja puolestaan ohjaa ylävesisäiliön vedenpinnan taso. Alasäiliön pumppujen tehoa kuristetaan tällä hetkellä ohjausventtiilillä; painehäviö on viitisen metriä.

Tuusulan pohjavedenottamoista Fira ja Lahela toimivat aikasäätöisesti osan vuorokautta. Rusutjärven ottamo voi toimia sekä Keravan että Tuusulan ylävesisäiliöiden vedenpintojen ohjaamana.

Järvenpään ja Tuusulan rajalla toimiva paineenkorotuspumppu toimii sekä Keravan että Tuusulan ylävesisäiliöiden vedenpinnan tasojen ohjaamana. Edellinen ohjaa lisäksi Keravan ja Tuusulan rajalla olevaa moottoriventtiiliä.

Nykyisten säätömenetelmien mukaiset yläsäiliöiden vedenpinnan muutokset normaaleissa kulutusolosuhteissa on esitetty kuvassa 7. Keravan yläsäiliön hitaat vedenpinnanvaihtelut johtuvat alasäiliön vähäisestä käytöstä, koska Keravan ottamo syöttää veden nykyisellään korkeapaineisena suoraan verkkoon.

Nykyisin käytettävät säätörajat verkon eri osissa on esitetty taulukossa 1.



Kuva 7. Vesitornien vedenpintojen tasot nykyisillä säätörajoilla ja normaaleilla kulutuskuvioilla.

V E S I J O H T O V E R K O S T O N S I M U L O I N T I

SAATOKORTIT

TYYPPI	SOLMU-ID	PAINEP	ALARAJA	YLARAJA	AL-ID	AL-PAINEP	LO-ID	LO-PAINEP	TILAT
PS	308	C	108.300	109.530	801	C	326	C	PCP
PS	239	B	94.400	96.350	323	C	222	B	VCC
TS			6.000	18.000	501	A	49	A	PCC
PS	40	A	103.100	103.400	502	A	46	A	PCC
PS	40	A	102.500	103.400	503	A	46	A	PCC
TS			25.000	26.000	505	A	43	A	PCP
TS			25.000	26.000	506	A	7	A	PCP
PS	308	C	107.300	109.530	2	A	337	C	PCP
PS	239	B	94.050	96.350	2	A	337	C	PCP
TS			6.000	23.000	808	C	324	C	PCC
TS			5.000	24.000	807	C	301	C	PCC
PS	40	A	104.100	104.680	507	A	430	A	PCC
PS	239	B	93.550	96.000	601	B	937	B	PCC

Selitykset:

PS painesäätöinen elementti
TS aikasäätöinen elementti
SOLMU-ID elementtiä ohjaavan vesisäiliön numero
PAINEP painepiirin tunnus
ALARAJA alakatkaisuraja (m) PS-korteilla ja aikasäädön alempi raja (klo) TS-korteilla
YLARAJA ylä " " ylempi " "
AL-ID elementin alkusolmun numero
AL-PAINEP " " painepiirin tunnus
LO-ID " " loppusolmun numero
LO-PAINEP " " painepiirin tunnus
TILAT P = pumppaus päällä, V = venttiili auki, C = suljettu yhteys
Ensimmäinen kirjain kertoo elementin tilan alemmalla säätöarvolla, toinen ylemmällä säätöarvolla ja kolmas elementin tilan simuloinnin alkuhetkellä

4.3 Malli (= pelkistetty verkko) ja sen kalibrointi

4.31 Verkon pelkistys ja pelkistetyn mallin kalibrointi

Vedenjakelujärjestelmän mitoitus ja ohjauksen suunnittelu edellyttävät mm.

- jakelujärjestelmän nykyisen kapasiteetin analysointia
- jakelujärjestelmän nykykapasiteetin riittävyyden analysointia veden kulutuksen kasvaessa
- laajennustoimien ja ohjaustoimien merkityksen selvittelyä kapasiteetin lisääjänä

Verkon pelkistys

Mainittujen selvitysten suorittaminen kohtuullisella työllä edellyttää yleensä sekä verkoston kuvaamista todellisesta yksinkertaistetulla järjestelmällä eli järjestelmän pelkistämistä että tietokoneen hyväksi käyttöä rutiinilaskelmien helpottamiseksi. Järjestelmän yksinkertaistaminen tapahtuu toisaalta pelkistämällä verkko ja toisaalta yhdistämällä yksittäiset vedenkulutuspisteet näitä edustaviin verkon kohtiin. Toimenpidettä kutsutaan verkkoa kuvaavan matemaattisen mallin muodostamiseksi. Jos tämä pelkistetty malli kuvaa todellista verkkoa, suunnittelu voidaan suorittaa pelkistettyä mallia hyväksi käyttäen, ts. suunnitellut toimenpiteet tutkitaan pelkistetyssä järjestelmässä.

Verkon rakennetta pelkistettäessä poistetaan suunnittelun kannalta merkityksettömät elementit sekä kootaan rinnakkaisia ja peräkkäisiä johtoja ekvivalenttijohdoiksi. Rakenteellinen pelkistäminen tapahtuu useimmiten siten, että tiettyä kokoa pienemmät johdot poistetaan lukuunottamatta kuitenkin niitä johtoja, jotka ovat osana toiminnan kannalta ilmeisesti merkittävässä silmukoissa. Verkon pelkistämistekniikka on kehittynyt voimakkaasti viime aikoina, minkä vuoksi pelkkää tiettyä johtokokoa pienempien joiden poistamista verkosta ei voida vastaisuudessa pitää kaikissa tapauksissa riittävänä.

Bree et al. /2/ ovat käsitelleet rinnakkaisten ja peräkkäisten johtojen yhdistämistä, tiettyjen solmujen poistamista erityyppisiä pelkistysmenetelmiä hyväksikäyttäen sekä kulutusten jakamista erittäin laajasti.

Mallien luokittelu

Shamir (1973) jakaa mallit kolmeen luokkaan niiden pelkistysasteen mukaan /14/:

- "White box"-malli muodostuu kaikkien elementtien ja niiden keskinäisten suhteiden tarkasta matemaattisesta esityksestä.
- "Black box"-malli saadaan määrittämällä tarkasti aktiivisten elementtien suhteet ja pelkistämällä järjestelmän passiivinen osa. Tämä perustuu olettamukseen, että pelkistetyn järjestelmän lähtötietojen ja tulostietojen välillä on jokin numeerinen riippuvuus ja että riippuvuutta kuvaavat parametrit on saatu numeerisesti kokeillen. Parametrien arvot perustuvat joko mitattuihin tuloksiin tai "white box"-mallin antamiin tuloksiin.
- "Grey box"-malli rajoittuu kuvaamaan osaa systeemiä pienellä määrällä komponentteja, joille on sama tai selvästi yksinkertaistettumpi matemaattinen esitystapa kuin varsinaisilla jakelujärjestelmän komponenteilla.

TSV:n mallit

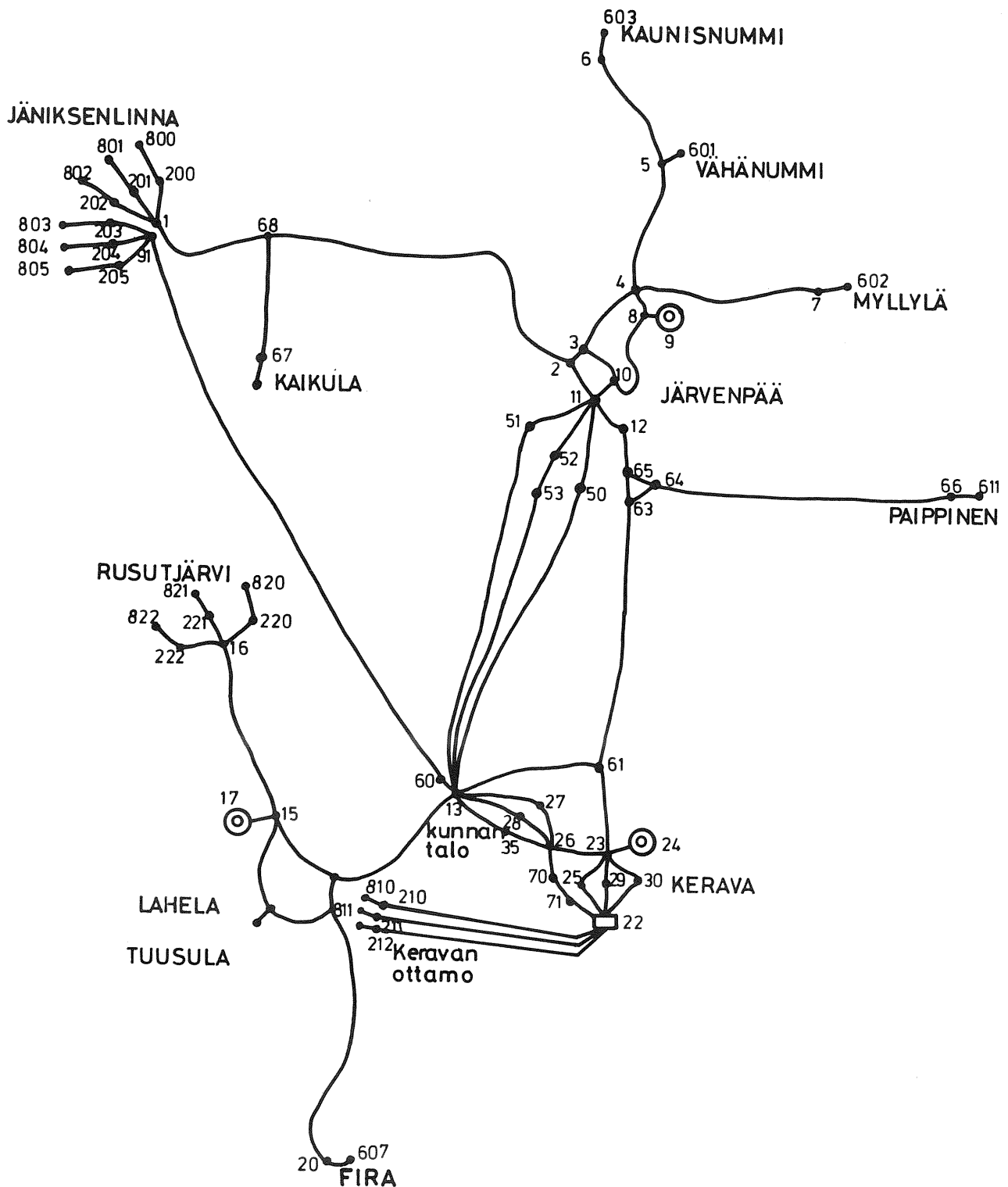
Edellä esitettyjä perustyyppisiä yhdistelemällä päädytään uusiin, pelkistysasteeltaan poikkeaviin malleihin. Tuusulan Seudun Vesilaitoksen vedenjakelujärjestelmää kuvattiin kahdella mallilla, jotka edustivat voimakkaasti pelkistettyjä ja vähän pelkistettyä "grey box"-mallia. Alunperin edellinen malli koostui 28 elementistä ja jälkimmäinen noin 200 elementistä, mutta luvut kasvoivat hypoteettisten elementtien käyttöönoton myötä. Hypoteettiset elementit ovat sellaisia kuviteltuja elementtejä, joita käyttäen ohjel-

massa olevat, tietyt puutteet todellisen tilanteen kuvaamisessa voidaan eliminoida. Esim. ottamon kuvaaminen kolmena pumppuna, joiden edessä on aikaohjattu venttiili, mahdollistaa kolmen, ajan mukaan vaihtuvan ohjaustavan käytön vuorokaudessa. Jos pumppulla on eri säätötavat, vaikkapa klo 7-21, 21-23 ja 23-7, niin pumppu on kuvattava kolmena pumppuna, koska ohjelma voi ottaa huomioon vain yhden aikasäädön pumppua kohden simulointijakson aikana.

Keravan alasäiliön kahdesta pumpusta vain toinen toimii kerrallaan ja silloinkin kuristettuna. Koska ohjelmalle ei voi antaa venttiilikäyrää, kuristusventtiilin läpi tapahtuva syöttö on kuvattu tapahtuvaksi vastaavan keskimääräisen painehäviön omaavan putken lävitse, ts. hypoteettista elementtiä käyttäen. Painehäviötä olisi voinut vaihdella venttiilin kuristuksen mukaisesti muutaman muun, hieman ominaisuuksiltaan poikkeavan putken avulla, joista vain yksi olisi ollut kerrallaan käytössä paine- ja virtaamaoloista riippuen. Hypoteettisia elementtejä lisäämällä saavutettu hyöty olisi kuitenkin ollut projektin kannalta vähäinen eikä tähän näin ollen menty.

Kuva 6 esittää isoa mallia ilman hypoteettisia elementtejä ja kuva 8 pientä mallia kaikkine hypoteettisine elementteineen. Alustavat ja suuntaa antavat tietokoneajot suoritettiin aina ensin pienellä mallilla ja saadut tulokset varmennettiin tai tarkennettiin isolla mallilla. Näin säästettiin sekä ajoissa että tietokonekustannuksissa. Etenkin eri vaihtoehtojen kartoitusvaiheessa pieni malli mahdollisti useiden ajojen suorittamisen ison mallin yhtä ajokertaa vastaavin kustannuksin.

Vähän pelkistetty "grey box"-malli pelkistettiin poistamalla lähes kaikki alle \varnothing 150 johdot. Tuusulassa ja Järvenpäässä oli yhteensä noin 6 km \varnothing 125 mm ja \varnothing 100 mm johtoja, jotka niiden hydraulisen merkittävyyden vuoksi otettiin malliin. Tarkkojen kulutustietojen ollessa helposti saatavissa jakelujohdon kulutukset jaettiin johdon molempiin päihin.



Kuva 8. Pieni malli hypoteettisine elementteineen.

Koska käytettävissä olevat kulutustiedot olivat kaupunginosittaisia, osa-alueen koko kulutus jaettiin kulutussolmuille niiden vaikutusalueen väestötiheyden mukaisesti. Verkon toiminnan kannalta irrallisten osa-alueiden sisäisiä johtoja ei ole esitetty, vaan koko osa-alueen kulutus on kerätty syöttöjohdon päässä olevaan solmuun. Näin on tehty Keravan verkossa Ahjon kaupunginosassa (solmu 215). Pienessä mallissa kuvattiin pumppu-, venttiili- ja säiliötiedot tarkasti, mutta taajamakohtaiset johtoverkostot pelkistettiin siirtoyhteyksiksi ja muutamiksi kulutuspisteiksi.

Kalibrointiprosessi

Ennen pelkistetyn mallin käyttöönottoa ja suunnittelua sen avulla on pystyttävä osoittamaan, että malli todella kuvaa olevaa järjestelmää riittävän tarkasti. Termillä kalibrointi ymmärretään prosessia, jolla malli saatetaan toimimaan hyväksyttävällä tarkkuudella.

Kalibrointiprosessin voidaan katsoa koostuvan seuraavista vaiheista:

1. Määritetään tutkimuksen tavoitteet, mallille merkitykselliset muuttujat, lähtötietojen saatavuus ja lähtötietojen täydentämismahdollisuudet.
2. Määritetään tutkimuksen tavoitteiden ja lähtötietojen saatavuuden perusteella rakennettavan mallin pelkistysaste.
3. Muokataan lähtötiedot mallille soveltuvaan muotoon.
4. Määritellään tutkimusperiodi ja selvitetään tästä mahdollisesti johtuvat toimet lähtötietojen täydentämiseksi. Periodiin sisällytetään poikkeavia kuormitustilanteita.
5. Muutetaan matemaattista mallia siten, että se on edellisten kohtien kanssa sopusoinnussa.

6. Suoritetaan tutkimusperiodia vastaava ajo ja verrataan tuloksia havaittuun aineistoon.
7. Sovitetaan mallin parametrit siten, että mahdollisimman hyvä tulos saavutetaan. Jos malli toimii hyväksyttävästi, kalibrointi on onnistunut.
8. Jos mallin toimintatarkkuus ei ole hyväksyttävä, niin muutetaan mallin rakennetta ja palataan kohtaan 6.

Kalibrointiajoissa saatavaa kokemusta käytetään lisäaineiston saatavuuden selvittämiseksi.

Kalibroinnin suoritus TSV:n tapauksessa

TSV:n järjestelmää kuvaavat mallit kalibrointiin 2.6.1975 mitatulla havaintoaineistolla. Mallivuorokauden vedenkulutustiedot laskettiin sekä ottamoiden että säiliöiden piirturikäyristä. Pumpuille määritettiin toisen asteen pumppukäyrät pienimmän neliösumman menetelmällä. Useimpien pumppujen toimintapiste määritettiin kenttähavaintojen perusteella. Pumppukäyriin tuli näin kulumisesta yms. johtuvat muutokset huomioon otetuiksi. Sekä havaintoaineiston kulumuskuvioiden määrittämiseksi että ohjelman WATSIM 2 lähtötietojen täydentämiseksi vesisäiliöiden vedenpinnan muutoksia vastaavat tilavuuden muutokset oli laskettava. Tätä tarkoitusta varten konstruointiin kullekin säiliölle tilavuuskorkeuskäyrä, missä säiliön tilavuus esitettiin pohjasta lasketun korkeuden kolmannen asteen käyränä.

Mallivuorokauden tuntivaihtelukertoimet kullekin taajamalle approksimoitiin näihin tietoihin perustuen. Saadut kertoimet on esitetty kuvassa 9. Tuusulan Seudun Vesilaitoksen alueen keskimääräiset vedenkulutustiedot ennusteineen ilmenevät seuraavalla sivulla olevasta taulukosta.

Suunnittelualueen vedenkulutusennusteet

	1974 (m ³ /vrk)	1985 (m ³ /vrk)	2000 (m ³ /vrk)
Järvenpää	5 000	10 000	18 000
Kerava	5 400	10 800	16 000
Tuusula	1 980	7 040	13 460
- Hyrylä	1 600	5 100	10 000

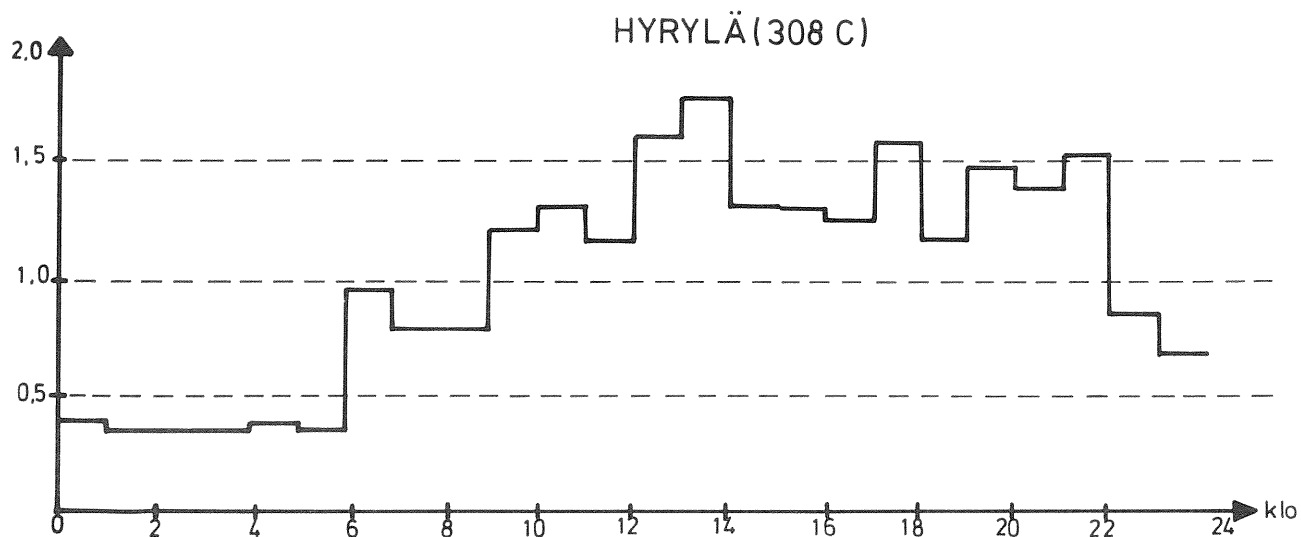
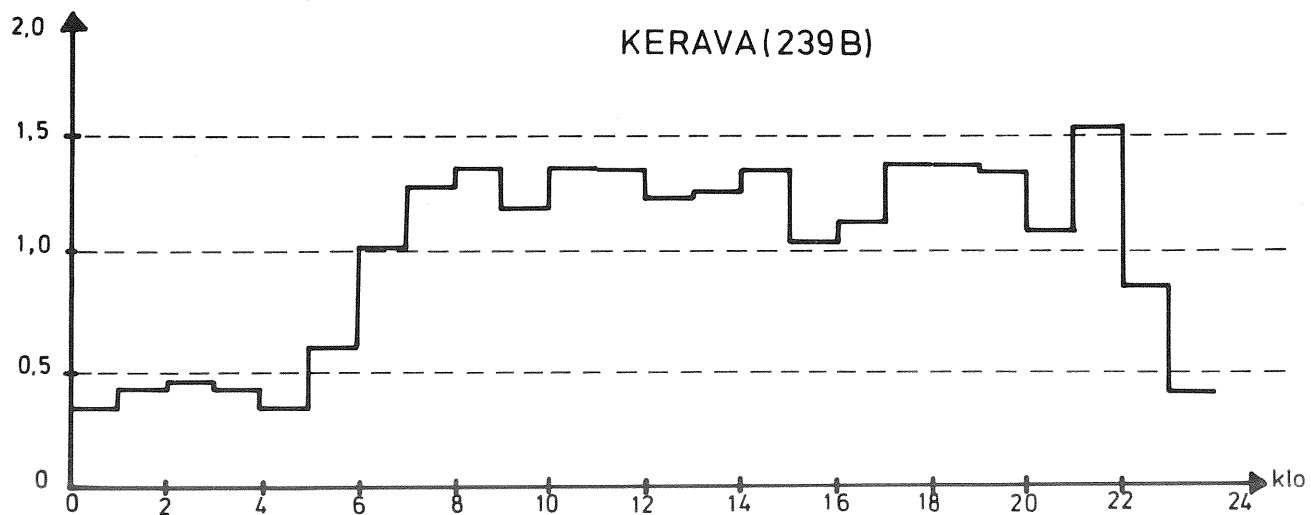
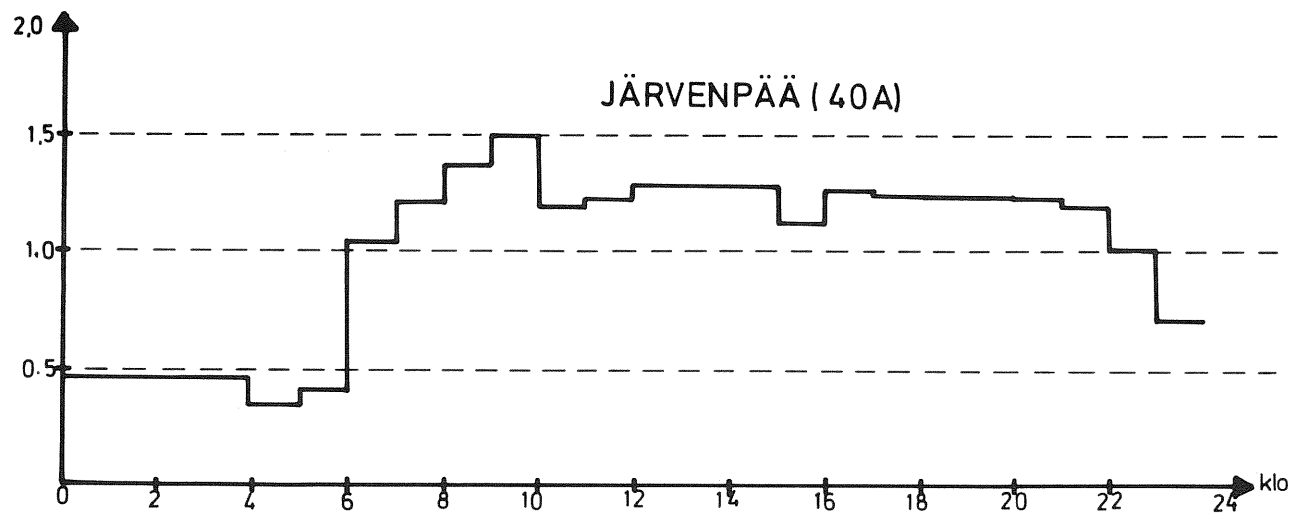
Kalibrointi yhden mallivuorokauden tietojen perusteella on riittävä isolle mallille, joka melko tarkasti kuvaa todellista jakelujärjestelmää. Voimakkaasti pelkistetty pieni malli sitä vastoin olisi vaatinut kalibroinnin useissa kuormitustilanteissa. Muita mallivuorokausia ei kuitenkaan tutkittu, koska pienen mallin toiminta havaittiin luotettavaksi ison mallin antamien tulosten perusteella ja koska sen tarkalla kalibroinnilla ei olisi saavutettu projektin kannalta uutta, hyödyllistä tietoa.

4.32 Kalibrointitulosten analysointi

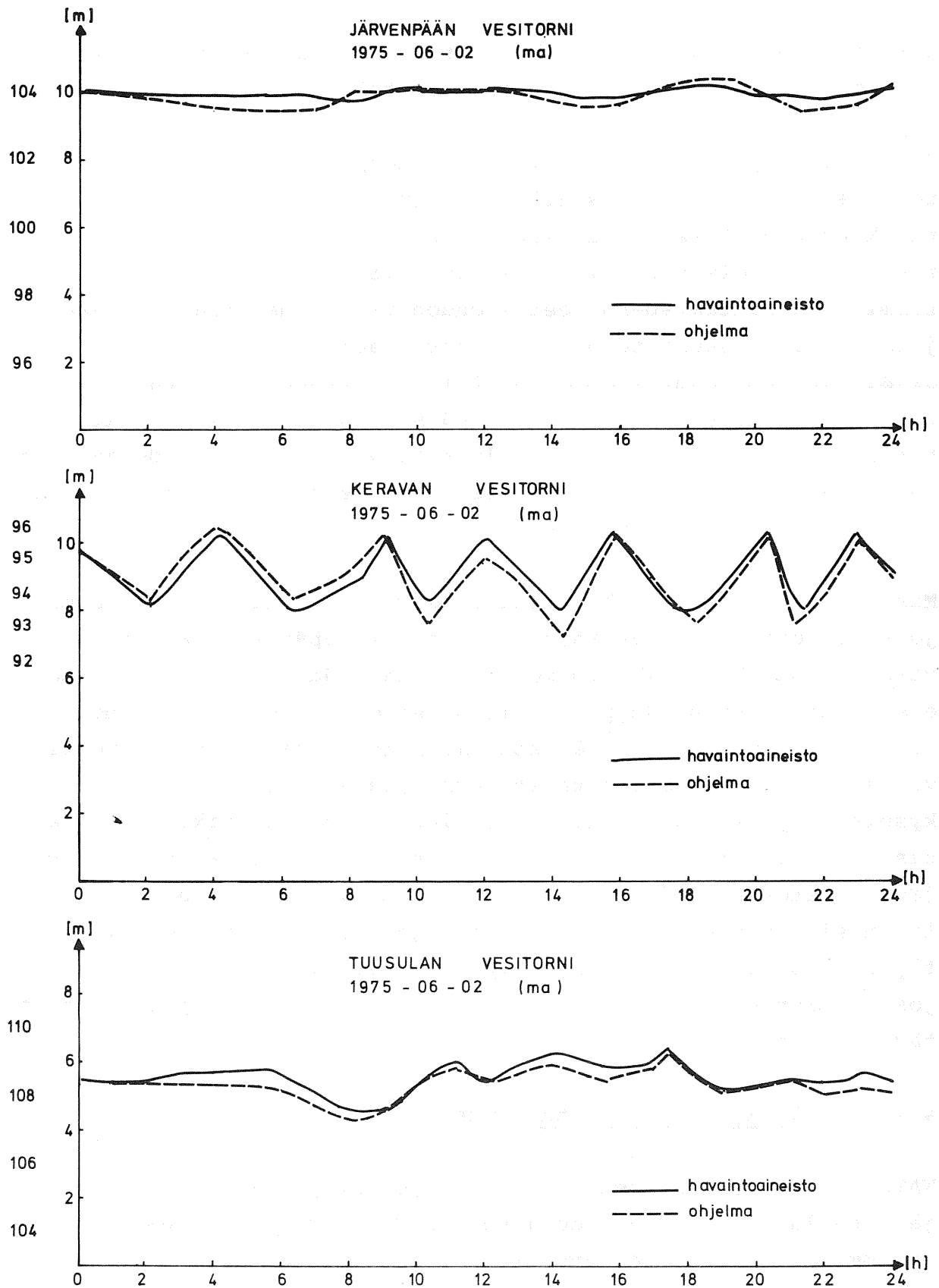
Ison mallin kalibroinnin tulokset näkyvät kuvasta 10.

Keravan alasäiliön toimintaa ei voitu kalibroida, koska siihen syöttävän Keravan ottamon matalapainepumput on saatu asennetuiksi vasta vuoden loppupuolella.

Kuvan 10 mukaisesti havaitaan mallin antamien tulosten ja todellisten havaintojen olevan varsin lähellä toisiaan. Jos todella selviä poikkeamia olisi esiintynyt, vika olisi ollut todennäköisimmin säiliöiden tilavuuskorkeuskäyrissä, pumppukäyrissä tai kulutuskuvioissa. Myös kaikki säädettävät elementit tulisi tarkistaa. Niinpä esim. TSV:n tapauksessa ensimmäiseksi suoritetussa ajossa havaittiin Keravan ja Hyrylän vesitornien ohjelman laskemien ja todellisten vedenpintojen tasojen poikkeavan toisistaan selvästi klo 22:n jälkeen. Selitykseksi löytyi Keravan ja Hyrylän verkkojen painepiirien välillä oleva venttiili, jonka piti olla kiinni klo 22:n jälkeen, mutta joka oli jäänyt osittain



Kuva 9. Vedenkulutuksen vaihtelukertoimet 1975-06-02.



Kuva 10.

auki ja ainoastaan kuristi kyseistä yhteyttä. Kun tämä otettiin huomioon, päädyttiin kuvassa olevaan tulokseen.

Todellisten ja ohjelman laskemien vedenpinnan tasojen pienet vaihtelut aiheutunevat pääasiallisesti tuntivaihtelukertoimien epätarkkuudesta. Laskentatarkkuuteen vaikuttavat lisäksi pumppukäyrien aproksimoiminen toisen asteen käyrillä, johtojen karkeuskertoimien määrittämisperusteet (johdon ikä ja materiaali) sekä ohjelman omat laskentatekniset aproksimaatiot. Koska lasketut arvot eivät ole systemaattisesti todellisten arvojen ylä- tai alapuolella, havaittuja eroja voidaan pitää satunnaisina. Täten kalibrointitulokset on varmentanut mallin luotettavuuden TSV:n vedenjakelujärjestelmän kuvaajana ja suunnitteluun soveltuvana todellisen järjestelmän yksinkertaistuksena.

Mikäli lasketuissa ja havaituissa arvoissa esiintyy poikkeamia, jotka voidaan osoittaa karkeuskertoimien epätarkkuuksista johtuviksi, uudet karkeuskertoimet joudutaan määrittämään yrityksen ja erehdyksen kautta. Käypiin karkeuskertoimiin päätymistä nopeuttaa luultavasti muutamille järjestelmien toiminnan kannalta merkittävälle johdoille suoritettavat herkkyyksianalyysit, joilla tutkitaan kyseisten johtojen karkeuskertoimien muutosten vaikutuksia painetasoihin ja virtaamiin. TSV:n järjestelmässä Jäniksenlinnan pohjavesilaitoksen syöttöjohto Järvenpäähän, Keravan ja Tuusulan välinen siirtoyhteys sekä Järvenpään ja Tuusulan välinen siirtoyhteys, olisivat olleet tämän tyyppisen herkkyyksianalyysin kohteina, jos mallien kuvauskyky ei olisi sellaisenaan osoittautunut riittävän tarkaksi.

4.4 WATSIM 2:n käytön tavoitteet

WATSIM 2 on tyypillinen simulointiohjelma, jonka tavoitteena on jäljitellä todellisen vedenjakelujärjestelmän tapahtumia mahdollisimman tarkasti. Sen avulla ei voida optimoida eikä suoraan tarkastella järjestelmän toiminnan luotettavuutta. WATSIM 2 määrittää tiettyä lähtötilannetta seuraavat tapahtumat annettujen ohjausta-

pojen mukaisesti, joten sen avulla kokenut suunnittelija voi nopeasti verrata eri ratkaisuja toisiinsa.

Simulointiohjelman avulla on pyritty löytämään vastauksia mm. seuraaviin kysymyksiin:

- Toimiiko järjestelmä suunnitellulla laajennusohjelmalla tyydyttävästi ohjevuoteen 1985 saakka?
- Mitä ohjauslaitteita ja mihin sijoitettuna järjestelmän luotettava ja helposti ohjattava toiminta edellyttää?
- Voidaanko järjestelmän kokonaistaloutta parantaa muuttamalla investointiohjelmaa?
- Missä määrin voidaan ohjausteknisin toimin vähentää nykyisiä ja tulevia energiakustannuksia?
- Onko Keravalla perusteltua jatkaa alasäiliön käytön kehittämistä?

TSV:n alueella on käytetty sähkön hintana 15,0 p/kWh klo 7-23 ja yöllä 10,5 p/kWh. Energiakustannuksia säästävien, vaihtoehtoisten ohjaustapojen määrää ovat rajoittaneet vaatimukset palovesireservistä ja painetasojen riittävydestä. Nämä ehdot täyttänyt järjestelmä on luokiteltu luotettavaksi; säiliöissä palovesireservin lisäksi olevan vesimäärän antamaa lisävarmuutta ei ole voitu ottaa huomioon tämän tarkastelun puitteissa.

4.5 Mallin käyttösovellukset

4.51 Energiakustannusten säästö ohjauksen avulla

Energiakustannusten muodostuminen

Energiakustannusten suuruuteen vaikuttavat seuraavat päätekijät:

- Pumppujen käyttämän sähköenergian hinta on yöllä halvempaa kuin päivällä. Tällöin on edullista tyhjentää vesitorni palovesirajaan asti päivätariffin aikana ja täyttää säiliö yöllä.
- Ottamoiden pumppauskustannukset riippuvat nostokorkeudesta. Kustannuksissa voidaan säästää pitämällä vedenpinnan tasoa varmuusnäkökohtia vaarantamatta mahdollisimman alhaisena.
- Ottamoiden oikea käyttöönottojärjestys ja käyttötapa vaikuttavat kustannusten muodostumiseen.

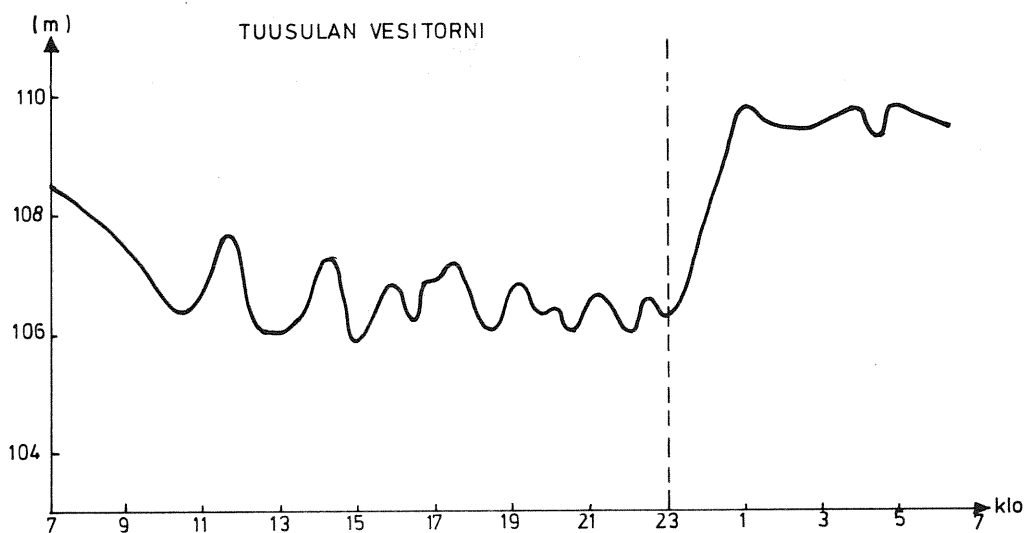
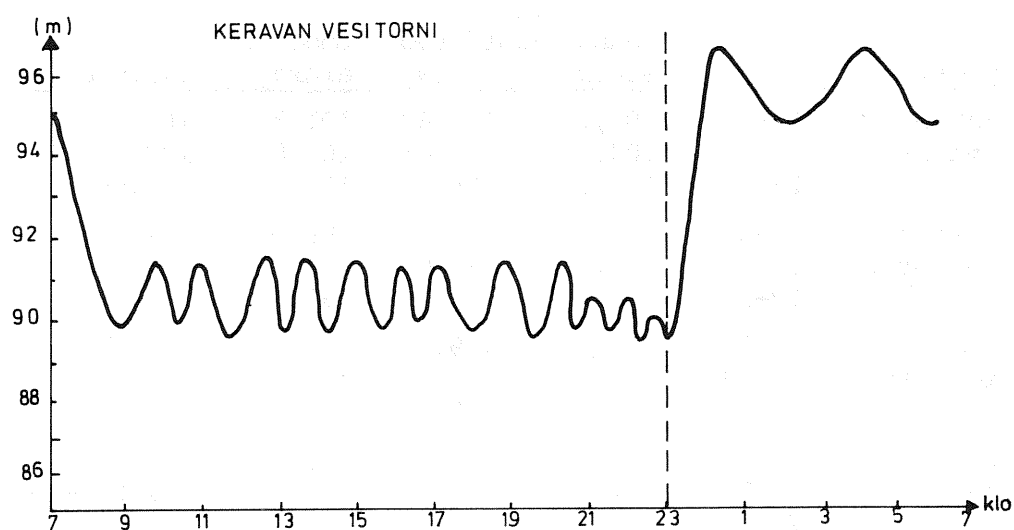
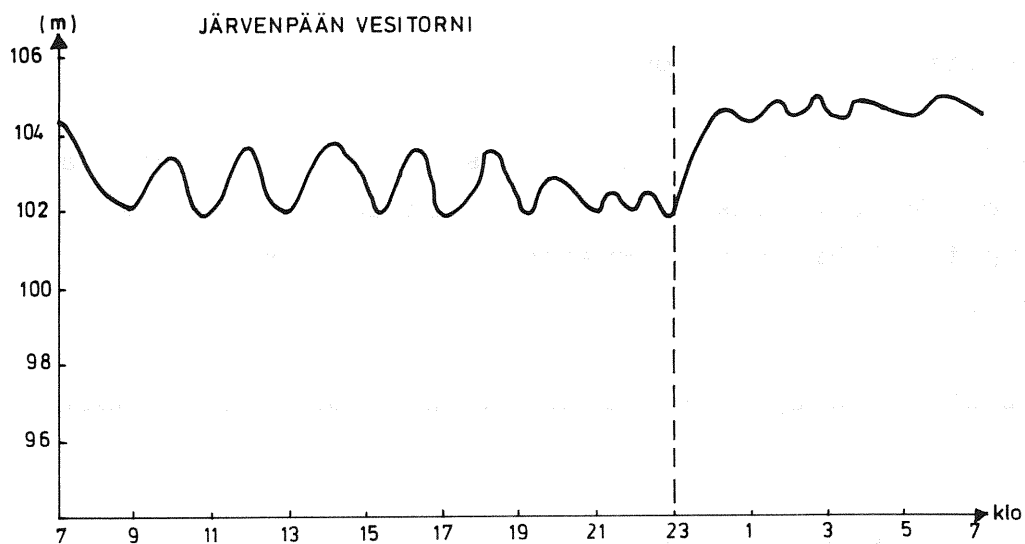
Säätörajojen määrittäminen

Kuvassa 11 on esitetty ylävesisäiliöiden toiminta nykykulutuksella energiankulutuksen kannalta edullisin säätörajoin. Säätörajojen määrittäminen on suoritettu kokeilemalla aluksi yhtä ohjaustapaa. Saadun tuloksen perusteella on muutettu tiettyjä säätöarvoja ja ajo on uusittu. Näin jatkaen on päädytty kuvan mukaiseen tulokseen. Säiliöiden täyttämisen aloittaminen tulisi siirtää tapahtuvaksi klo 23:n ja klo 3:n välisenä aikana, jotta pumppujen nostokorkeutta voitaisiin pienentää myös yöllä.

Tietokonelaskentojen tulokinnan helpottamiseksi kaikki täyttövaiheet on kuitenkin aloitettu klo 23, jolloin helposti nähdään, täytykö tutkittava säiliö yön kuluessa.

Järvenpäässä ei voida käyttää säiliötä tehokkaasti hyväksi pumppauskustannusten pienentämiseksi, sillä alueen paikoittaiset painevaikeudet edellyttävät lähellä HW:tä olevaa vedenpinnan tasoa. Vesitornin korkeusaseman tulisi olla nykyistä suuremman, jotta kriittiset painetasot voitaisiin eliminoida ja päästäisiin samantyyppiseen käyttötapaan kuin Keravalla ja Tuusulassa. Toinen vaihtoehto olisi järjestää talokohtaisia paineenkorotuksia.

Keravan alasäiliön pumpun suuri teho yläsäiliön tilavuuteen nähden aiheuttaa katkokäyntiä. Saatujen tulosten perusteella TSV onkin



Kuva 11. Vesitorniien käyttöesimerkki.

päätynyt teholtaan pienemmän pumpun hankkimiseen.

Tuusulan Seudun Vesilaitoksen kohdalla saavutettava säästö vastaisi suunnilleen VVY-tutkimuksen "vesihuollon taloudellisuus" mukaan arvioituja vesisäiliöiden hoitokustannuksia. Tarkempi kustannuserittely on kohdassa 4.56.

Taulukossa 2 on esitetty kuvan 11 tulosten perusteella suositetut säätöarvot.

Taulukko 2. Säätörajasuositukset

Ohjattava elementti	Ohjaava elementti	Klo	Vanhat säätöarvot		Ehdotett. säätöarvot	
			alaraja	yläraja	alaraja	yläraja
Jäniksenlinnan ottamo	Järvenpään vesitorni	07-20	104,1	104,68	101,8	103,5
		20-23	104,1	104,68	101,8	102,5
		23-07	104,1	104,68	104,2	104,68
Keravan alasäiliö	Keravan vesitorni	07-21	93,55	96,0	89,5	91,5
		21-23	93,55	96,0	89,5	90,5 (90,0)
		23-07	93,55	96,0	93,55	96,0
Rusutjärven ottamo	Tuusulan vesitorni	07-20	108,3	109,53	106,0	107,5
		20-23	108,3	109,53	106,0	106,5
		23-07	108,3	109,53	109,0	109,53
Moottori-venttiili	Keravan vesitorni	07-21	94,4	96,35	90,0 (89,5)	92,5 (91,55)
		21-23	94,4	96,35	90,0 (89,5)	91,0 (90,0)
		23-07	94,4	96,35	94,4	96,35
Paineenkorotuspumppu	Tuusulan vesitorni	07-20	107,3	109,53	106,0	107,5
		20-23	107,3	109,53	105,5	106,5 (106,0)
		23-07	107,3	109,53	107,5	109,5
Vähänurmi	ottamon muuttaminen aikasäätöiseksi					

Taulukossa 2 suluissa esitetyt arvot ovat kuvaa 11 vastaavat, mutta niiden sijaan on suositeltu suluitta olevia säätöarvoja. Tällä on haluttu pidentää pumppujen kutakin käynnistymistä seuraavaa käyntiaikaa. Myös jotkut suositellut kellonajat ovat kuvaa vastanneita arvoja myöhempiä, koska säiliöiden vedenpinnan tason laskeutuminen minimiarvoonsa on haluttu tapahtuvan juuri ennen klo 23.

Muiden kuin mainittujen ottamoiden käyttö on ollut entisellään, joskin Vähänummen aikasäättäminen helpottaisi sen keskimääräistä antoisuutta vastaavaan käyttöön pääsemistä. Tätä ei varmuussyistä kannata suorittaa ennen kuin v. 1979, jolloin huipputunnin vedentarve voidaan tyydyttää Jäniksenlinnan tekopohjavesilaitoksen avulla. Ottamon käyttö painesäätöisellä ohjauksella merkitsee käyttöön otetun vesimäärän riippumista Järvenpään vedenkulutuksesta, joten ottamon vuorokautinen käyttö poikkeaa usein keskimääräisestä antoisuudesta.

Säiliötilan optimaalisessa käytössä energiakustannusten säästö on vain yksi tekijä. Yhtä tärkeää on säiliötilan käytöllä taata jakelujärjestelmän mahdollisimman luotettava toiminta. Luotettavuuden kriteerit eivät ole yksiselitteisiä eivätkä kustannusten kanssa yhteismitallisia. WATSIM 2:lla ei voida ottaa varmuuteen liittyviä näkökohtia huomioon muuten kuin siten, että suunnittelija harkitsee jokaisen tutkitun ratkaisun järkevyyden.

4.52 Hydraulisen ratkaisun valinta

Vaihtoehdot

TSV ryhtyy ottamaan raakavettä Päijänne-tunnelista sen toisen rakennusvaiheen valmistuttua v. 1978. Raakavesi johdetaan Jäniksenlinnan tekopohjavesilaitokseen, jonka keskimääräinen kapasiteetti tulee olemaan n. 17 000 m³/vrk. Laitos otetaan käyttöön v. 1979. Tekopohjavesi johdetaan jo rakennettua Ø 400 mm johtoa Järvenpään sekä rakennettavaksi suunniteltua Ø 400 mm johtoa Tuusulan kunnantalon tienoille ja siitä edelleen Keravalle Ø 500 mm johdossa.

Ohjelman WATSIM 2 avulla pyrittiin selvittämään, tulisiko Jäniksenlinnasta kunnantalolle tuleva johto kytkeä kunnantalon kohdalla Hyrylän verkkoon. Kuvan 8 merkintöjen mukaan tutkittiin kolmea vaihtoehtoa:

1. Johto 13-60 ja johto 13-61 yhtyvät solmussa 13.
2. Johto 13-60 ja johto 13-61 eivät yhdy solmussa 13, ts. käy-

tään johtoa 60-61.

3. Johto 13-60 ja venttiilillä ohjattava johto 13-61 yhtyvät solmussa 13.

Ratkaisun valinta

Kuvassa 12 on esitetty vuorokausisimulointien tulokset. Jos kunnantalolle (solmu 13) on suora yhteys (vaihtoehto 1), Keravan vesitorni täyttyy ja Tuusulan vesitorni samanaikaisesti tyhjenee. Tämä johtuu siitä, että Tuusulan vesitornin HW on 13 metriä Keravan tornin HW:tä korkeammalla ja että vesitornien väliset yhteydet olisivat sangen väljät. Kuten kuvasta näkyy, tyhjenemistä ei estä Keravan ja Järvenpään vesitornien lähellä HW:tä olevan vedenpintojen tasot.

Kun Jäniksenlinnasta saatava tekopohjavesi pumpataan suoraan Keravalle (vaihtoehto 2), mitään vaikeuksia ei esiinny vuodenvaihteen 1986...1987 ennustetuilla kulutuksilla. Kuvasta 12 ilmenee, että ohjaustapa toimii moitteetta.

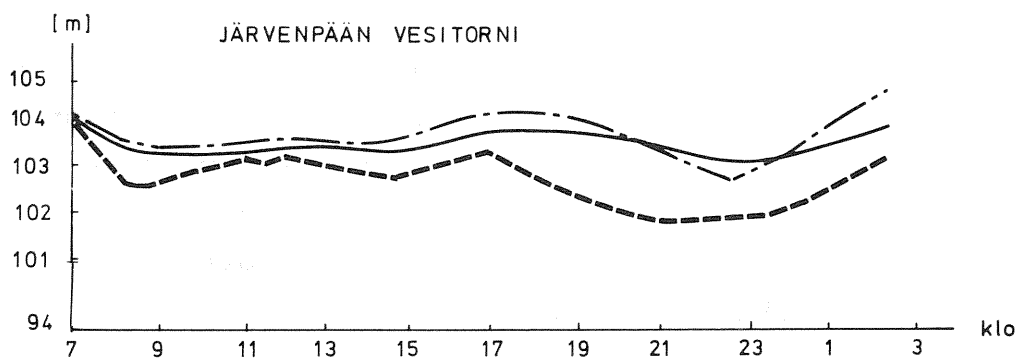
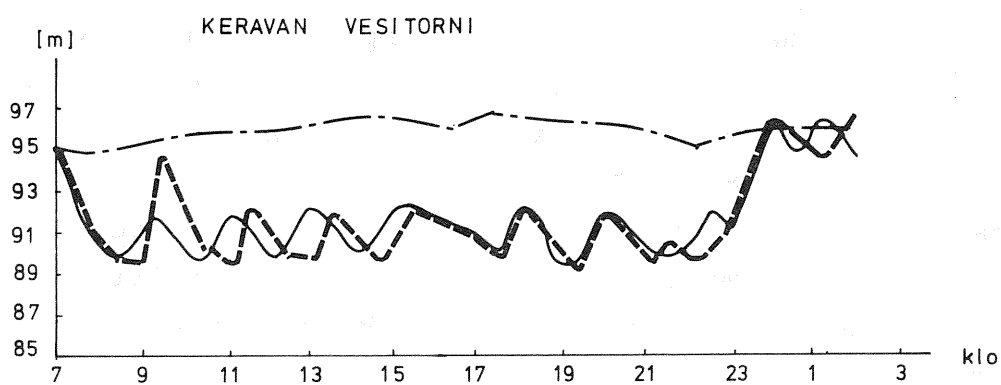
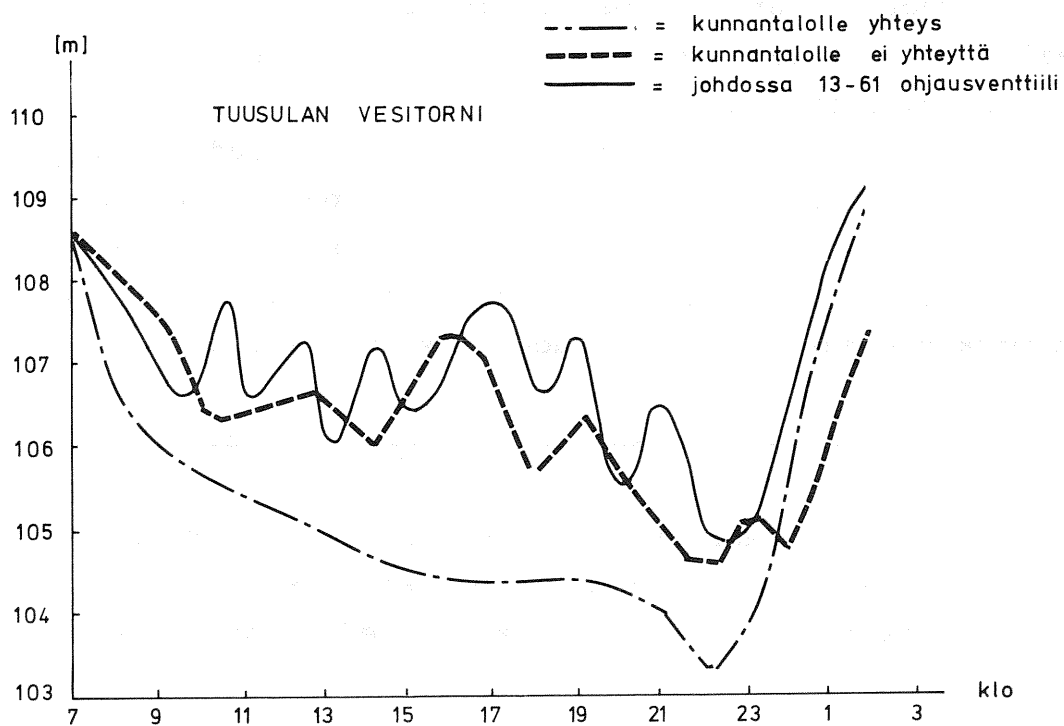
Jos Jäniksenlinnasta tulevalla syöttöjohdolla on yhteys Tuusulan verkkoon kunnantalon kohdalla ja jos yhteyttä 13-61 ohjataan venttiilillä (vaihtoehto 3), koko jakelujärjestelmän normaali toiminta voidaan taata. Suoritetussa simulointiajossa yhteyttä ohjattiin venttiilillä, joka sulkeutui ja aukeni Keravan ylävesisäiliön säätörajojen 92,0 m ja 89,5 m mukaan.

Kaksi viimeksi mainittua tapausta ovat molemmat toimintakelpoisia. Yhteyden 13-61 ohjaus venttiilillä on varmempi käytössä kuin eri painepiireihin rakentaminen, koska varayhteyksien määrä on siinä suurempi.

4.53 Yläsäiliötilan riittävyys

Säiliötilan riittävyyteen vaikuttavat säiliöiden ja pumppujen kapasiteetit sekä noudatetut ohjaustavat. Jos pumppujen kapasiteetti

HYDRAULISEN RATKAISUN VALINTA
1986 / 1987 - KULUTUS



Kuva 12.

ei riitä tyydyttämään kulutusta, tarvittava lisävesi on otettava yläsäiliöistä. Saatava vesimäärä riippuu sekä säiliötilavuudesta että palovesivarauksen suuruudesta. Palovesivarauksen osuuden määrittäminen perustuisi luotettavuuden ja taloudellisuuden optimoimiseen joten siihen ei ole menty, vaan paloveden osuus on määritetty aiempien näkemysten mukaisesti. Jos pumppukapasiteetti riittää vedenkulutuksen vaihteluiden kompensoimiseen, yläsäiliötilan merkitys jää käyttövarmuuden lisäämiseen.

TSV:n järjestelmän ylävesisäiliöiden kapasiteettitarkastelu ulotettiin vuoteen 1985, jolloin Päijänne-tunnelin III rakennusvaiheen tuoma vesi saadaan kulutukseen. Säiliötilan riittävyden kehitystä seurattiin simuloimalla kaikkia jakson 1975...1985 aikana lisävettä tuovia rakennushankkeita edeltäneitä kulutustilanteita.

Jäniksenlinnan v. 1979 käyttöön otettavan tekopohjavesilaitoksen pumput on suunniteltu mitoittettavaksi 1,5-kertaista keskimääräistä kulutusta vastaavasti. Kyseisten pumppujen pumppukäyrät tehtiin sellaisiksi, että saavutettavat maksimi-arvot pumppujen tuotolle ja nostokorkeudelle olivat laskentaa varten 1,3 x keskimääräinen antoisuus ja 85 m. Tällä haluttiin tutkia, riittääkö 1,3-kertainen pumpputeho ohjevuoteen 1985 asti. Myönteisessä tapauksessa 1,5-kertaisen mitoituksen voidaan olettaa riittävän tyydyttämään tietyn aikaa kyseisen vuoden jälkeenkin mahdollisesti esiintyvät tehovaatimukset.

Kuten kuvasta 12 jo ilmeni, säiliötilavuus suositelluilla ohjaustavoilla riittää ohjevuoteen 1985 asti. Kulutuksen kasvun vuoksi Hyrylän eteläosissa alkaa kuitenkin ilmetä painevaikeuksia syöttöyhteysien käydessä ahtaiksi. Tästä syystä onkin 1980-luvun alkupuolella rakennettavaksi suunniteltu uusi ylävesisäiliö (solmu 357) tarkoituksenmukaista toteuttaa.

Hydraulisen ratkaisun vaihtoehdossa (no 1) yhdistettiin Jäniksenlinnasta syöttävä siirtoyhteys kunnantalon kohdalta samaan paine-

piiriin Tuusulan verkon kanssa. Vaihtoehdon toimivuus haluttiin määrittää, vaikka vaihtoehto hylättiin. Nykyistä säiliökapasiteettia käyttäen simuloitiin eri ajankohtia. Tällöin havaittiin, ettei sangen lähellä HW:tä olevilla säätörajoillakaan selvitä kuin vuoden 1981 ennustetusta huippuvuorokausitilanteesta. Toisenlaisella ohjauksella järjestelmän toiminta häiriytyy jo vuot- ta aikaisemmin.

Suoritettujen ajojen perusteella jomman kumman suositellun hyd- raulisen ratkaisun valinta takaa nykyisen järjestelmän säiliöka- pasiteetin riittävyys ohjevuoden 1985 huippuvuorokautta vastaa- vaan tilanteeseen asti. Hyrylään suositetaan rakennettavaksi joko toinen ylävesisäiliö 1980-luvun alkupuolella tai Lahelasta etelään johtava uusi yhteys (johto 301-358) v. 1985 verkon riittävän pai- netason turvaamiseksi.

4.54 Alasäiliön käyttö

Keravan ottamon keskimääräinen antoisuus on $2\,700\text{ m}^3/\text{vrk}$. Alasäi- liön tilavuus $3\,600\text{ m}^3$ ylittää selvästi ottamon vuorokautisen an- toisuuden. Koska alasäiliön kapasiteetti ylittää siihen pumppaa- van ottamon kapasiteetin, alasäiliön tätä tehokkaampi käyttö edel- lyttää lisäveden saamista Keravan verkosta. Tämä on jo nykyisin järjestelyin mahdollista.

Keravan keskustassa johtojen vähäinen reservikapasiteetti suosii erityisesti alasäiliön voimakasta syöttöä huipputuntikulutuksen aikana.

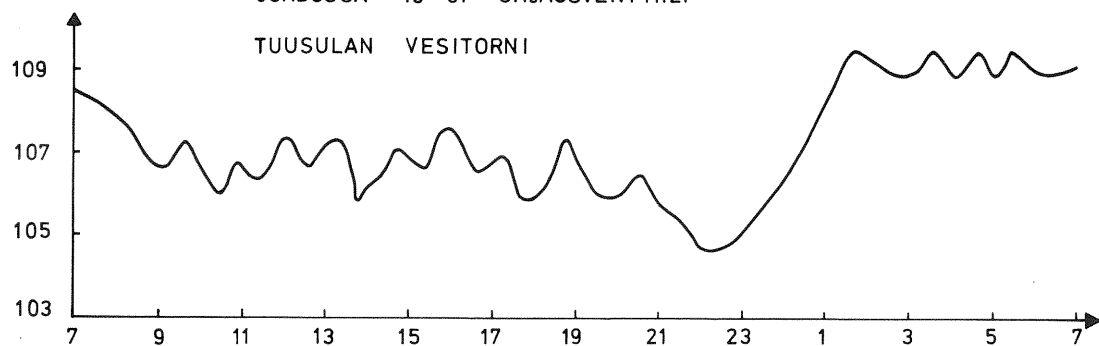
Vuoden 1988 ennustetulla kulutuksella suoritettun simulointiajon tulos on esitetty kuvassa 13. Kunnantalolta Keravan pohjoisosiin syöttävä johto on varustettu ohjausventtiilillä (säätörajat edel- leen 89,5 m ja 92,0 m). Sekä säiliön täyttö verkosta että ottamon käyttö on haluttu suorittaa pääasiassa sähkön yötariffin voimassa ollessa.

ALASÄILIÖN TEHOSTETTU KÄYTTÖ

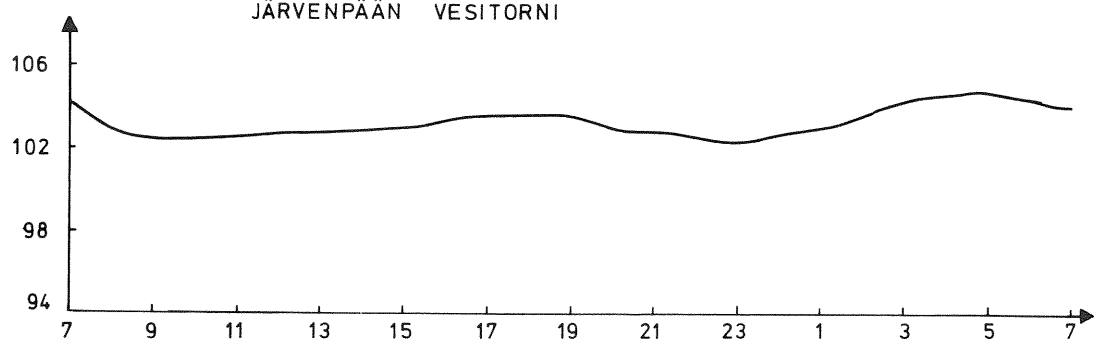
1988-KULUTUS

JOHDOS 13-61 OHJAUSVENTTIILI

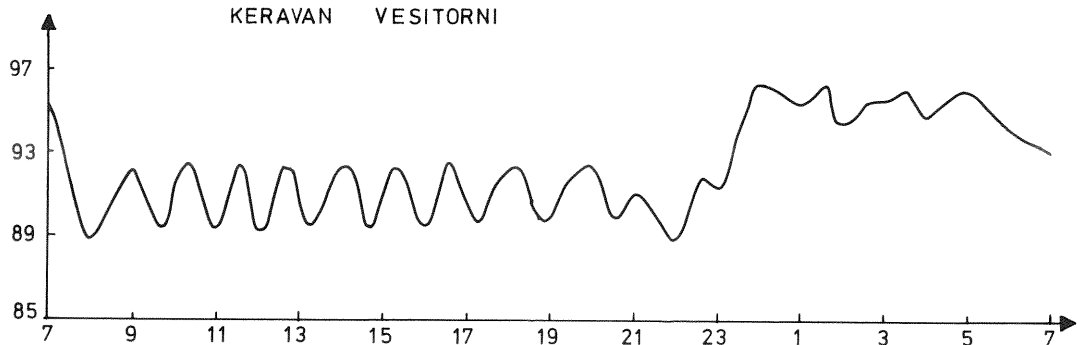
TUUSULAN VESITORNI



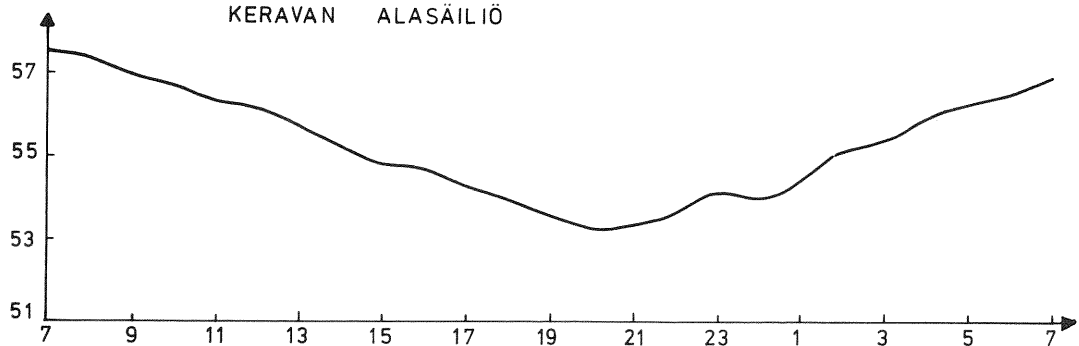
JÄRVENPÄÄN VESITORNI



KERAVALAN VESITORNI



KERAVALAN ALASÄILIÖ



Kuva 13.

Kuvassa 13 esitettyyn lopputulokseen on päästy taulukossa 3 esitettyä ohjaustapaa noudattaen.

Taulukko 3. Käytetty ohjaustapa

Ohjattava elementti	Ohjaava elementti	Klo	Alaraja (m)	Yläraja (m)
Keravan ottamo	Alasäiliö	07-20	53,5	54,5
		20-23	53,5	54,5
		23-07	57,5	58,0
Alasäiliö (käyttö)	Yläsäiliö	07-21	89,5	92,0
		21-23	89,5	90,5
		23-07	94,7	96,5
Alasäiliö (täyttö verkosta)	Alasäiliö	21-07	57,0	57,5
	Yläsäiliö	23-07	90,0	96,0
Johdon 13-61 venttiili	Yläsäiliö	07-07	89,5	92,0
Johdon 13-26 venttiili	Yläsäiliö	07-20	89,5	92,5
		20-23	89,5	90,5
		23-07	94,4	96,35

Alasäiliön vuorokautinen enimmäiskäyttö olisi $2\,700\text{ m}^3$, jos sitä ei täytettäisi verkosta. Käytetyllä ohjaustavalla alasäiliön vuorokautinen käyttö (kuva 13) oli $5\,700\text{ m}^3$. Tällöin Keravan ottamo pumppasi tästä määrästä $2\,100\text{ m}^3$ ja loppu $3\,600\text{ m}^3$ saatiin verkosta. Verkosta tapahtuva täyttö oli $\sim 90\text{ l/s}$ ja tapahtui yötariffin voimassa ollessa klo 23.45 - 07.00. Keravan ottamon pumppujen teho ei mahdollista ottamon koko antoisuuden käyttöä yötaksan aikana. Mainittuun käyttöön pääsemiseksi $2\,100\text{ m}^3$:n pumppaaminen tapahtui yhtäjaksoisesti klo 19.00 - 07.00. Ottamon keskimääräisestä antoisuudesta jäi käyttämättä 600 m^3 . Jos edellä esitettyyn ohjaustapaan mennään, Keravan ottamo kannattaa luonnollisesti tehdä aikasäätöiseksi, jolloin vuorokautinen käyttö saadaan vastaamaan keskimääräistä antoisuutta.

Alasäiliön käyttöä voidaan edelleen tehostaa vähentämällä pumppu-

jen kuristusta ja tehostamalla säiliön verkosta tapahtuvaa täyttöö. Saadun tuloksen perusteella TSV onkin ryhtynyt suunnittelemaan uutta täyttöyhteyttä.

Kustannustarkastelu on esitetty kohdassa 4.56.

4.55 Jakelujärjestelmän käyttövarmuus

Tuusulan Seudun Vesilaitoksen vedenjakelujärjestelmän yleissuunnitelman (1975) hydraulinen ratkaisu perustuu stationäärisen tilan laskevan tietokoneohjelman käyttöön. Koska stationäärisen tilan laskeva ohjelma ei simuloi ajan mukana säätyviä elementtejä (kuten venttiileitä), ei niiden toimintaa voida tarkasti tutkia. WATSIM 2:n käytön avulla on päästy seuraavanlaiseen varmuudeltaan saman arvoiseen ratkaisuun, jonka varayhteyksien määrä on kuitenkin suurempi ja näin ollen järjestelmä on myös varmempi käytössä:

- Jäniksenlinnan tekopohjavesilaitoksen Järvenpään ja Hyrylän verkkoihin syöttävät pumput rakennetaan eri painepiireihin.
- Keravan ja Hyrylän rajalla sijaitseva moottoriventtiili oli ehdotettu suljettavaksi vuonna 1979. Tämä ei ole välttämätöntä, vaan kyseistä venttiiliä tulisi ohjata kuten kohdissa 4.51 ja 4.54 on esitetty.
- Jäniksenlinnasta Hyrylän kautta Keravalle syöttävä siirtoyhteys oli suositeltu rakennettavaksi ilman yhteyttä Hyrylän verkkoon. Yhteys kunnantalon kohdalle voidaan kuitenkin rakentaa, jos jatko-yhteyttä Keravalle säädetään ohjausventtiileillä (4.51 ja 4.54) ja jos jo olemassa olevan yhteyden venttiiliä säädetään kohdan 4.54 mukaisesti.

Kun edellä esitetyn lisäksi ohjausventtiileillä mahdollistetaan rakennettavan Paippisten ottamon koko vesimäärän ohjaaminen joko Keravalle tai Järvenpäähän, vuoden 1985 ja sitä edeltäneiden ajankoh- tien jakelujärjestelmät omaavat mahdollisimman monia varayhteyksiä

putkirikkojen aiheuttaman haitan ehkäisemiseksi.

4.56 Hyöty-kustannusanalyysi

Säiliöiden mitoituksen tarkistus

Kaupunkiliiton julkaisussa B 34 "Vedenjakelujärjestelmän yleiset mitoitusohjeet" todetaan seuraavaa:

- Tarpeellinen vesisäiliöiden kokonaistilavuus on tavallisesti 40...50 % suurimman vuorokausikulutuksen arvosta pienehköillä jakelualueilla ja 25...40 % suurilla alueilla.
- Vedenkulutusvaihtelujen tasaamiseksi tarvittava säiliötilavuus on noin 15...30 % suurimmasta vuorokausikulutuksesta.

Edellisten kohtien perusteella edellytetään ohjeissa säiliötilaa vähintään 10 % suurimmasta vuorokausikulutuksesta käyttöhäiriöiden varalta ja sammutusvesivarastoksi. Julkaisussa B 34 edellytetään myöhemmin 10 %:n varausta käyttöhäiriöiden varalta, joten lähtökohtana hyöty-kustannusanalyysille pidetään kyseisen vesimäärän saamista pelkästään vesitorneista.

Järvenpään, Keravan ja Hyrylän keskimääräinen vuorokautinen vedenkulutus oli v. 1974 $12\,000\text{ m}^3$. Vuorokausikulutuskerrointa 1,33 käyttämällä suurimmaksi vuorokausikulutukseksi saadaan $16\,000\text{ m}^3$, mistä käyttöhäiriö- ja palovesivarausta on $1\,600\text{ m}^3$. Koska TSV:n alueen ottamoiden pumppujen kapasiteetti kykenee tasaamaan huippukulutuksen ja koska rakennettavat pumput aiotaan mitoittaa yhtä väljästi, säiliöihin ei tarvitse varata vettä vedenkulutuksen vaihtelujen tasaamiseen. Näin ollen nykyinen yläsäiliötilavuus $4\,000\text{ m}^3$ riittää vuoteen 1989 (huippuvuorokausikulutus $40\,000\text{ m}^3$). Jos sitä vastoin noudatettaisiin julkaisun B 34 mitoitusohjeita vedenkulutuksen vaihtelujen tasauksen osalta, nykyinen yläsäiliötila kävisi riittämättömäksi v. 1976. Suunniteltujen ottamoiden ja tekopohjavesilaitosten syöttöjohtojen kokoja ei voida muuttaa suun-

niteltua pienemmiksi, jos ottamoiden suurimman antoisuuden saamisen kulutukseen halutaan taata.

Kustannusvertailuja

Jos käyttöhäiriö- ja palovesivaraus on $1\,600\text{ m}^3$, lopun säiliökapasiteetin ($2\,400\text{ m}^3$) käyttö riippuu ohjaustavasta. Energiakustannuksia säästävässä ohjaustavassa palovesirajalta tapahtuva täyttö on $\sim 2\,000\text{ m}^3$ nykyistä melko läheltä HW:tä tapahtuvaa täyttöä suurempi. Tällöin säästetään 70 m:n nostokorkeutta sekä päivä- ja yötariffin hintaeroa (4,5 p/kWh:n) käyttämällä 7 000 mk/v (155 000 kWh). Jos Järvenpään riittävä painetaso ei edellyttäisi säiliön jatkuvasti korkeaa vedenpinnan tasoa, vaan noudatettu ohjaustapa olisi sama kuin Keravalla ja Tuusulassa, säästö kasvaisi 10 000 mk:aan (220 000 kWh).

Mikäli säiliöiden vedenpinnat pidetään lisäksi välittömästi käyttöhäiriö- ja palovesivarauksen yläpuolella 16 h/vrk, saavutettu säästö on 7 000 mk/v (50 000 kWh). Jos Järvenpään painevaikeuksia ei oteta huomioon ja jos pumppujen nostokorkeus määräytyy 20 h/vrk:ssa lähellä NW:tä olevin säätörajoin, säästö on 11 000 mk/v (80 000 kWh).

Käytännössä päästään energiakustannusten osalta helposti 10 000 mk/v...14 000 mk/v oleviin kokonaissäästöihin, mikä merkitsee 7...10 % vuotuisista energiakustannuksista.

Kohdassa 4.54 kuvatussa alasäiliön tehostetussa käytössä verkostosta tapahtuva alasäiliön täyttö oli $3\,600\text{ m}^3/\text{vrk}$. Tällöin alasäiliötä täyttävä vesi tulee ensin pumpatuksi ottamoilta alasäiliöön (sähkön yötariffin aikana) ja sitten alasäiliöstä verkkoon. Kustannuslisä muodostuu yläsäiliön ja alasäiliön korkeuseroa (40 m) vastaan suoritetusta pumppauksesta, mikä merkitsee v. 1988 noin 33 000 mk/v. Jos alasäiliötä ei käytettäisi tehokkaasti, vastaava vesimäärä olisi otettava rakennettavasta yläsäiliöstä. Tämän investointikustannukset olisivat $\sim 2,5\text{ mmk}$, jolloin vuotuiset käyttö-

ja pääomamenot (20 v, 8 %) olisivat 260 000 mk.

4.57 WATSIM 2 suunnittelussa

Simulointiohjelma WATSIM 2 soveltuu hyvin sekä itse jakelujärjestelmän että sen ohjauksen suunnitteluun. Pitkiä ajoaikoja vaativissa suunnittelutöissä apuna voidaan käyttää jotakin käyttökustannuksiltaan huokeaa, staattisen tilan laskevaa ohjelmaa, jolloin vasta varsinainen detaljisuunnittelu suoritetaan simulointiohjelman avulla. Ohjelmaan WATSIM 2 on sisällytetty staattisen tilan ratkaiseva ohjelma.

WATSIM 2:ta voidaan käyttää yleissuunnittelussa

- olemassa olevan säiliökapasiteetin riittävyyden määrittämiseen
- ylä- ja alavesisäiliöiden sekä korkeusaseman että tilavuuskorkeuskäyrien määrittämiseen
- johtojen koon määrittämiseen
- pumppujen kapasiteetin valintaan
- verkoston painetasomäärittämiseen

Ohjauksen suunnittelussa voidaan

- suunnitella uusia ohjaustapoja
- valita ohjattavat elementit
- simuloida järjestelmän toiminnan kannalta kriittisiä tilanteita

Yli puolet siitä ajasta, minkä tietokoneajojen suorittaminen vaatii, kului sekä itse ohjelman että käyttäjän oppaan puutteellisuuksien aiheuttamien virhetulosten selvittämiseen. Nämä puutteet on projektin aikana kyetty poistamaan.

Ohjelman toimintahäiriöt johtuivat pääasiassa tiedostojen, taulukoiden ja parametrien dimensioiden riittämättömyydestä sekä ohjelman omasta laskentatarkkuudesta. Saatujen kokemusten perusteella on jonkin taulukon dimension käydessä riittämättömäksi syytä suurentaa myös muut vastaavanlaiset taulukot.

Virhetilanteisiin johtaneet tapaukset on selvitetty kohdassa Järjestelmän säädön kuvaus.

5. HELSINGIN VEDENJAKELUVERKKO

Helsingin jakeluverkossa tutkittiin kaksi tapausta:

1. sovellus käytönvalvontaan ja ohjaukseen (putkirikko)
2. itäisten ja koillisten alueiden vedenjakelu vuosina 1980, 1985 sekä 1990

5.1 Alkuarvot

Helsingin vedenjakeluverkon laskentaa varten tehty verkkogeometria, siis pääjohtojen pituudet ja läpimitat, solmupisteiden numeerointi sekä painepiirien rajat on esitetty liitteenä 1 olevassa kartassa.

5.11 Johtotiedot

Verkkoon on otettu mukaan kaikki pääjohdot ($\varnothing \geq 400$ mm) sekä pienempiä johtoja ($\varnothing 200 \dots 300$ mm) silloin, kun niillä on oleellinen yhteys johonkin kulutussolmuun tai kun on kyse pienehkön osaluheen vedenjakelun tutkimisesta.

Putkien pituudet ja läpimitat on saatu johtoverkkokartasta. Karkeuskertoimet on arvioitu putken iän perusteella siten, että Hazen-Williamsin karkeuskerroin (c) uusille, puhtaille putkille on 100, käytetyille normaalikuntoisille putkille 80...90 sekä vanhoille likaisille putkille 60...70.

5.12 Painepiirit

Verkko on jaettu viiteen painepiiriin, joita yhdistävät suljetut putket, paineenkorotuspumppaamot tai säätöventtiilit. Painepiirit ovat:

- Ilmalan painepiiri (A)
- Alppilan painepiiri (B)
- Myllypuron painepiiri (C)
- Myllypuron ylemmän säiliön painepiiri (C)
- Lauttasaaren painepiiri (E)

5.13 Vesisäiliöt

Ylävesisäiliöiden tilavuuskäyrät (parabelit) on ohjelmaa varten laskettu tilavuustaulukoista pienimmän neliösumman menetelmällä. Tilavuustaulukoiden mukaan piirretyt säiliökäyrät ovat liitteinä 2...7.

Ilmalan ja Alppilan molemmat vesisäiliöt on yhdistetty samoiksi säiliöiksi, koska ne käytännössäkkin toimivat yleensä yhdessä.

Säiliösolmuja ovat:

- Ilmala 702
- Alppila 703
- Lauttasaari 704
- Myllypuron alempi säiliö 705
- Myllypuron ylempi säiliö 706
- Vuosaari 707

5.14 Pumput

Pumppukäyrät on laskettu pienimmän neliösumman menetelmällä valmistajien tehokäyristä. Myös hyötysuhteet on otettu valmistajien käyristä. Vanhankaupungin korkeapainepumppujen tehokäyriä on hieman muutettu suoritettujen mittausten perusteella.

Mallissa esiintyvät pumppaamot ovat:

- Pitkähämeen korkeapainepumppaamo 601-601 P
- Vanhankaupungin korkeapainepumppaamo Alppilan painepiiriin 602-602 P
- Vanhankaupungin korkeapainepumppaamo Myllypuron painepiiriin 603-603 P
- Paineenkorotuspumppaamo Alppilan painepiiristä Ilmalan painepiiriin 622-622 P
- Paineenkorotuspumppaamo Ilmalan painepiiristä Lauttasaaren painepiiriin 621-621 P
- Paineenkorotuspumppaamo Myllypuron painepiiristä Myllypuron ylemmän säiliön painepiiriin 623-623 P

5.15 Säätöventtiilit

Säätöventtiilit on kuvattu putkina. Niiden pituus, läpimitta ja karkeuskerroin on laskettu venttiilien valmistajien laatiman venttiilinomogrammin mukaan, josta vesimäärä ja paine-ero ovat luettavissa venttiilin koon ja avautumiskulman perusteella.

Mallissa esiintyvät säätöventtiilit ovat:

- Vuosaaren johtavissa putkissa olevat venttiilit 801-801 S ja 802-802 S
- Vanhankaupungin korkeapainepumppaamossa oleva venttiili Myllypuron painepiiristä Alppilan painepiiriin 603-602 P
- Lauttasaaren paineenkorotuspumppaamossa oleva venttiili 621-621 P

5.16 Kulutustiedot

Vedenkulutusmäärät kaupunginosien osa-alueita edustavissa kulutusolmuissa (11-541) on laskettu Helsingin kaupungin vesilaitoksen ns. kuluttajarekisterin 1974 perusteella.

Solmupisteiden kulutusvaihteluiden määrittämiseksi valittiin kymmenen erilaista kuluttajatyyppeä. Jokaista tyyppiä edustavassa kiinteistössä suoritettiin vedenkulutusmittauksia. Näiden perusteella laskettiin kulutuskuviot eri kuluttajatyypeille, jotka ovat:

- kerrostalo, esikaupunkialue (LC 1)
- kerrostalo, kantakaupunki (LC 2)
- rivitalo (LC 3)
- omakotitalo (LC 4)
- liikekeskus, esikaupunki (LC 5)
- liikekeskus, kantakaupunki (LC 6)
- sairaala (LC 7)
- liikenteen rakennus (LC 8)
- muu julkinen rakennus (LC 9)
- teollisuuslaitos (LC 10)

Vesilaitoksen kuluttajarekisteristä ilmenee keskimääräisen kulutuksen jakaantuminen jokaisessa solmupisteessä mainittujen eri kuluttajatyyppeiden kesken. Kullekin osakulutukselle muodostettiin kulutuskuvio mittaustulosten perusteella, jonka jälkeen solmupisteen kulutuskuvio saatiin summakäyränä. Malli kalibroitiin kohdassa 5.2 selostettavalla tavalla 26.6.1975 vallinnutta tilannetta vastaavaksi, mitä käytettiin putkirikkotapauksen mitoituslaitteena. Keskimääräiset kulutukset ja kulutuskuviot ovat liitteinä 8 ja 9. Niissä esiintyvät merkinnät käyvät selville WATSIM2-ohjelman käyttäjän oppaasta.

Vedentoimitus Espooseen ja Vantaalle on myös kuvattu mittausten perusteella lasketulla kulutuskuviolla (LC 31). Myyntisolmuja ovat 591-593 ja 596.

Kulutusennusteet, joita käytettiin tutkittaessa vedenjakelua Helsingin koillisilla (MaTaPuPu) ja itäisillä esikaupunkialueilla v. 1980, 1985 ja 1990, on muodostettu kaupunkisuunnitteluviraston laatimien asukasluku- ja kerrosalaennusteiden perusteella. Suurimman vuorokausikulutuksen kertoimena on mittausten perusteella käytetty arvoa 1,45. Kulutukset on esitetty liitteinä 10.

5.2 Mallin kalibrointi

5.21 Mittaukset

Kalibrointia varten suoritettiin torstaina 26.6.1975 ympärivuorokautiset painemittaukset pisteissä 621 A (Porkkalankatu), 31 B (Unioninkatu), 491 C (Laajasalo) sekä 472 D (Vesala). Lisäksi koottiin tiedot vesisäiliöiden vedenpinnoista, pumppujen käyttöajoista, korkeapainepumppaamoista pumpatuista vesimääristä sekä säätöventtiilien käytöstä.

5.22 Kalibroinnin suorittaminen

Koska kaikki painepiirit ovat yhteydessä toisiinsa paineenkorotus-

pumppaamoiden tai säätöventtiilien välityksellä, oli koko Helsingin mallilla suoritettava karkea kalibrointi, jotta saataisiin selville painepiiristä toiseen siirtyvä vesimäärä. Kalibroinnissa pyrittiin saavuttamaan vesisäiliöiden ja mittauspisteiden todelliset painetasot putkien karkeuskertoimia ja putkina kuvattujen säätöventtiilien pituuksia muuttamalla.

Karkean kalibroinnin jälkeen erotettiin Helsingin itäiset ja koilliset esikaupungit omaksi osamallikseen (painepiirit C ja D), koska tutkittavat case-tapaukset 5.3 ja 5.4 ovat näissä painepiireissä. Osamallin yhteys painepiiriin B (säätöventtiili 603P-602P) oletettiin kulutussolmuksi, jonka keskimääräinen kulutus sekä kulutuskuvio saatiin koko Helsingin mallista (LC 41).

Osamallin kalibrointia jatkettiin samalla periaatteella kuin koko Helsingin mallissakin.

Virhelähde mallia kalibroitaessa on pumppujen kulumisen käytössä. Ei siis voida olla täysin varmoja valmistajien antamien pumppukäyrien paikkansapitävyydestä tällä hetkellä. Poikkeuksena ovat Vanhankaupungin pumput, joiden teho on mitattu.

Kulutuskuviot aiheuttavat toisen suuren virheen, joka ilmenee siten, että kulutuskuvioilla sekä keskimääräisillä kulutuksilla laskeutu painepiirin kokonaiskulutusjakuma ei vastaa todellista kulutusjakumaa. Tämän eliminoimiseksi on laadittu erillinen ohjelma, joka korjaa eri kulutuskuviot (jokaista mahdollisimman vähän) painepiireittäin niin, että niiden summa vastaa todellisuutta. Tätä ohjelmaa on selostettu kohdassa 5.23. Kulutuskuviot kalibroitiin tällä ohjelmalla niin, että niiden summa vastasi kahden tunnin kokonaiskulutusta painepiireittäin (A+E, B sekä C+D).

Kulutuskuviot numeroitiin painepiireittäin uudelleen seuraavalla sivulla olevan luettelon mukaisesti.

Alkuperäinen kulutuskuvio
(liite 9)

Kalibroitu kulutuskuvio LC
(liite 11) painepiirissä

LC	tyyppi	A+E	B	C+D
1	kerrostalo, esikaupunki	31	16	1
2	kerrostalo, kantakaupunki	32	17	2
3	rivitalo	33	18	3
4	omakotitalo	34	19	4
5	liikekeskus, esikaupunki	35	20	5
6	liikekeskus, kantakaupunki	36	21	6
7	sairaala	37	22	7
8	liikenteen rakennus	38	23	8
9	mm. julkinen rakennus	39	24	9
10	teollisuuslaitos	40	25	10
21	puhd.laitoksen oma käyttö	41	26	11
31	myynti muille kunnille	42	27	12

Kalibroituja kulutuskuvioita (liite 11) käytettiin koko Helsingin mallia lopullisesti kalibroitaessa. Putkirikkotapaus sekä Helsingin itäisten ja koillisten alueiden vedenjakelu tutkittiin sen sijaan alkuperäisillä kulutuskuvioilla, koska kalibroituja ei vielä ollut käytettävissä.

Koko Helsingin mallia kalibroitaessa havaittiin, että Ilmalan säiliö (702) pyrki iltapäivällä täyttymään liikaa sekä lopulta illalla vuotamaan yli. Pitkäkosken korkeapainepumppaamosta (601 P) pumpattiin mallissa siis liikaa vettä verkostoon. Tarkasteltaessa ylimääräisen vesimäärän suuruutta tultiin siihen tulokseen, että mallissa on ilmeisesti käyttöpäiväkirjan virheen seurauksena käynyt klo 13 - 24 yksi pumppu enemmän kuin todellisuudessa. Kun laskentaa muutettiin niin, ettei käytetty pumppua PK 4 (6014, tuotto keskimäärin 400 l/s), Ilmalan säiliö täyttyi normaalisti.

Säiliöiden kalibroidut pinnankorkeudet sekä paineet mitatuissa pisteissä on esitetty liitteissä 12...21.

5.23 Kulutuskuvioiden kalibroinnissa käytetty ohjelma

Mallin kokonaiskulutuksen poikkeaminen toteutuneesta kokonaiskulutuksesta mallin kalibroituaikavälillä aiheuttaa systemaattista

poikkeamaa todellisen järjestelmän ja sen mallin suureiden välille. Parhaiten tämä on todettavissa vesisäiliöiden pinnankorkeuksien muutoksista. Mallin ja todellisen järjestelmän kokonaisvuorokausikulutuksen poikkeaminen toisistaan aiheuttaa sen, että mallin ja todellisen järjestelmän säiliön pinnankorkeuksien ero pyrkii ajan mukana kasvamaan tai vähenemään yhä enemmän sen mukaan, onko toteutunut vuorokausikulutus pienempi vai suurempi kuin mallin vuorokausikulutus.

Mallin ja toteutuneen kokonaisvuorokausikulutuksen poikkeaman lisäksi on tarpeen korjata myös poikkeamat kulutusten hetkellisarvoissa. Painepiirin kokonaiskulutuksen hetkellisarvoissa olevat erot aiheuttavat samansuuntaisia eroja mallin ja todellisen vesisäiliön vesimäärien hetkellisarvoissa.

Liitteenä 43 on esitetty laskennalliset kaavat, joilla kalibrointi suoritettiin HKV:ssa.

Liitteessä esitetty algoritmi toimii sanallisesti kuvattuna seuraavasti. Aluksi normitetaan jokaisen kulutuskuvion hetkellisarvojen keskiarvo ykköseksi (askel 1^o). Tämän jälkeen korjataan kulutuskuvioiden arvot hetkellä 1 suorittamalla suhteellisesti samansuuruinen korjaus kuhunkin kulutuskuvioon. Koska kunkin kulutuskuvion hetkellisarvojen summan tulee pysyä muuttumattomina, tulee kunkin kulutuskuvion seuraavien hetkellisarvojen summasta vähentää kulutuskuvioon ajanhetkellä 1 suoritettu lisäys. Tämä vähennys suoritetaan kunkin kulutuskuvion arvoon hetkellä 2, jos tulos on negatiivinen. Jos jonkun kulutuskuvion kohdalla tulos on negatiivinen, kulutuskuvion arvo asetetaan nolllaksi ja jäljellä oleva osa vaadittavasta vähennyksestä suoritetaan kyseisen kulutuskuvion myöhemmistä arvoista. Seuraavaksi sovelletaan kuvattua menettelyä kuvioiden arvoihin hetkellä 2, 3, 4 ja tällöin saadaan kulutuskuviot korjatuiksi haluttuun muotoon.

Esitetyssä menetelmässä tarvitaan niin paljon laskutoimituksia, että niiden suorittaminen manuaalisesti vie paljon aikaa ja on

hyvin rutiininomaista. Lähinnä tämän vuoksi päädyttiin laatimaan tietokoneohjelma, joka laskee kulutuskuvioihin ja solmupisteiden keskimääräisiin vuorokausikulutuksiin tarvittavat korjaukset halutuille painepiireille lähtien alkuperäisistä LC- (kulutuskuvio) ja LA-korteista (kulutusmäärä) ja toteutuneen kokonaiskulutuksen arvoista. Ohjelmasta saadaan rivikirjoitintulosteena halutuilta painepiireiltä:

- solmupistekulutukseen tarvittavan suhteellisen korjauksen suuruus
- solmupistekulutukseen tarvittava absoluuttinen korjaus kulutustyypeittäin
- mallin alkuperäisen ja toteutuneen kokonaiskulutuksen hetkellisarvot
- mallin alkuperäiset ja korjatut kulutuskuviot

Korjatut kulutuskuviot saadaan myös reikäkorttitulosteina. Lisäksi ohjelma on helppo korjata sellaiseksi, että se tulostaa tarvittaessa reikäkortteina myös korjatut LA-kortit.

5.3 Sovellus käytönvalvontaan ja ohjaukseen

Tutkimuksen kohteena oli putkirikön sattuminen kriittisessä pääjohdossa suurimman kulutuksen aikana. Vuotanut vesimäärä oletettiin myös hyvin suureksi. Kartta putkirikosta ja sen seurauksista on liitteenä 22.

5.3.1 Lähtötilanne

Tutkimuksessa käytettiin Helsingin itäisten alueiden osamallia.

Lähtökohtana oli pääjohdon putkirikko Helsingin itäisellä esikau-punkialueella. Solmupisteiden 948 ja 949 väliseen $\varnothing = 800$ mm putkeen pisteeseen 1000 oletettiin klo 18.00 syntyvän halkeama, josta tapahtuu vuoto 880 l/s. Ohjelmateknisten seikkojen vuoksi jouduttiin kuitenkin pisteiden 948 ja 949 välinen putki oletettamaan suljetuksi vuodon alkamisesta lähtien, jolloin vuotomäärä jaettiin

painetasojen perusteella pisteisiin 948 (505 l/s) ja 949 (375 l/s).

Oletettiin, että vuoto huomataan 19.00:ään mennessä, jolloin puhdistuslaitoksen valvomosta voidaan käynnistää lisää pumppuja tai muuten kauko-ohjattujen säätöventtiilien asentoa.

Lisäksi oletettiin, että vuotokohdan eristäminen sekä muut mahdolliset kenttätöimet on tehty klo 20.00:een mennessä. Tällöin suljetaan myös yhteys Vantaalle Aartenetsijäntien rajamyyntipisteessä 591. Kahden tunnin ajanjakso 18 - 20 johtuu osittain kulutuskuvioiden jakson pituudesta.

5.32 Tutkimuksen kulku

Välittömänä vuodon seurauksena Vuosaaren säiliö (707) tyhjenee. Painetaso käy riittämättömäksi solmussa 473 (Mellunmäki) sekä kriittiseksi solmuissa 541 (Vuosaari) ja 452 (Puotila).

Vuodosta aiheutuvien haittojen minimoimiseksi tutkittiin viittä erilaista toimenpideohjelmaa. Toimenpiteet on eritelty seuraavalla sivulla olevassa vuototapaustaulukossa sekä painetasot esitetty graafisesti säiliöistä ja kriittisistä pisteistä liitteissä 23... 31. Myös vuodon aiheuttamat virtaussuuntien muutokset on esitetty kartalla (liite 22).

5.33 Lopputulos

Kokonaisuuden kannalta osoittautui edullisimmaksi tapaus V, joka perustui siihen, että Vanhankaupungin korkeapainepumppaamon ja Myllypuron paineenkorotuspumppaamon kapasiteettia hyväksi käyttäen vettä toimitettiin nopeasti Myllypuron yläsäiliöpiirin kautta vuotokohdan takana sijaitseville alueille: Mellunmäkeen, solmu 473 sekä Vuosaareen, 541 (liitteet 27 ja 28). Tyydyttävät painetasot saavutettiin klo 21.00:een mennessä, paitsi yläsäiliöpiirissä Vesalassa solmussa 472 klo 22.00:een mennessä (liite 31). Näin ollen painevaikeuksia oli alasäiliöpiirissä (C) klo 18-21 ja yläsäiliöpiirissä (D) klo 20-22.

VUOTOTAPAUSTAULUKKO

Normaali tilanne	Tapaus I	Tapaus II	Tapaus III	Tapaus IV	Tapaus V
<u>Pumput</u>					
VK 4 (700 l/s) käy koko ajan	VK 4 käy koko ajan VK 5 (700 l/s) käy 19-24	VK 4 käy koko ajan VK 5 käy 19-24 VK 7 (500 l/s) käy 19-22	VK 4 käy koko ajan VK 5 käy 19-24 VK 7 käy 19-22	VK 4 käy koko ajan VK 5 käy 19-24 VK 7 käy 19-22	VK 4 käy koko ajan VK 5 käy 19-24 VK 7 käy 19-22
MP 1 (90 l/s) käy 17-24, 23-24	MP 1 käy 17-21, 23-24	MP 1 käy 17-21	MP 1 käy 17-24	MP 1 käy 17-24	MP 1 käy 17-24
MP 3 (200 l/s) käy 21-23	MP 3 käy 21-23	MP 3 käy 21-23	MP 3 käy 21-23	MP 3 käy 21-23	MP 3 käy 19-23
<u>Venttiilit</u>					
801 S 25 %	801 S kokonaan auki 19-24	801 S kokonaan auki 19-24	801 S kokonaan auki 19-24	801 S kokonaan auki 19-24	801 S kokonaan auki 19-24
802 S 10 % auki koko ajan	802 S kokonaan kiinni 19-20	802 S kokonaan kiinni 19-20	802 S kokonaan kiinni 19-20 sulkuventtiili välillä 473-956 auki 20-22	802 S kokonaan kiinni 19-20 kokonaan auki 20-22 sulkuventtiili välillä 473-956 auki 20-22	802 S kokonaan auki 20-22 sulkuventtiili välillä 473-956 auki 20-22

VK = Vanhakaupunki (603)

MP = Myllypuron paineenkor. (623)

Vuodon vaikutukset itäisten alueiden eteläosissa jäivät vähäisiksi. Solmuissa 432 (Roihuvuori) ja 491 (Laajasalo) tarvittavat painetasot alittuivat vain vähän (liitteet 29 ja 30). Koillisilla esikaupunkialueilla ei vuodon vaikutusta havaittu.

Putkirikkotapauksen tutkimisen yhteydessä ohjelmasta havaittuja näkökohtia on tarkasteltu erikseen kohdassa 5.51.

5.4 Helsingin itäisten ja koillisten alueiden vedenjakelu vuosina 1980, 1985 ja 1990

Malliin sisällytettiin sellaisenaan jo laaditut pääjohtojen rakentamissuunnitelmat vuosina 1976 - 83 sekä Roihuvuoren vesisäiliön (vesitilavuus 10 000 m³) käyttöönotto vuonna 1978.

Vuoden 1980 johtoverkko on esitetty kartalla (liite 32). Uusia pääjohtoja ovat MaTaPuPu-alueen $\varnothing = 600$ mm putkiyhteydet 962-963, 381-964, 964-392, 392-966, 966-967, 967-968 sekä Roihuvuoren säiliön (708) yhteysjohto 960-961. 1980-luvun alkupuolella rakennettavat MaTaPuPu-alueen pääjohdot 963-371 ja 371-964 on merkitty katkoviivoilla. Mahdolliselle MaTaPuPu-alueen säiliölle on varattu paikka (709).

Tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa oli määrä tutkia, kauanko mainituilla järjestelyillä pystytään turvaamaan itäisten ja koillisten alueiden vedenjakelu. Toisessa vaiheessa oli tarkoitus käyttää lisäksi säätöventtiileitä, kun ensimmäisen vaiheen mukainen järjestely ei enää riitä. Kolmantena vaiheena oli tarkoitus selvittää vesisäiliön tarpeen ajankohta MaTaPuPu-alueella.

5.42 Kulutukset

Lähtöarvoina käytettiin vuosien 1980, 1985 ja 1990 suurimpia vuorokausikulutuksia Q_{\max} ($= 1,45 \times Q_{\text{keskim.}}$). Kerroin 1,45 on saatu aikaisempien mittausten perusteella. Kokonaiskulutukset tutkimusalueella olivat tällöin vuorokaudessa

Vuosi	Q_{\max} l/s	$Q_{\text{keskim.}}$ l/s
1980	1 100	760
1985	1 370	950
1990	1 490	1 030

Vuosien 1980 ja 1985 kulutus jaettiin eri osa-alueiden (solmupisteet) ja kulutustyyppien kesken näiden vuosien asukasluku- ja kerrosalaennusteiden perusteella. Vuoden 1990 kulutus jaettiin samassa suhteessa kuin vuonna 1985, koska vastaavanlaisia ennusteita ei silloin ollut käytettävissä. Sähköenergian hintana on laskelmissa käytetty klo 7 - 21 14 p/kWh sekä klo 21 - 7 8 p/kWh.

5.43 Tutkitut tapaukset

Aluksi tutkittiin rinnakkain tilannetta vuosina 1980 ja 1985. Si-

mulointi suoritettiin aikavälillä klo 7 - 7, koska pyrkimyksenä oli, että vesisäiliöt (Myllypuro 705 ja Roihuvuori 708) olisivat täynnä aamulla klo 7. Niiden annettaisiin tyhjentyä päivällä klo 21:een asti alimpaan sallittuun vedenpintaan asti (sammutus- ja varastovesiraja). Vastaavasti säiliöt täytettiin mahdollisimman tasaisella pumppauksella klo 21 - 7, jolloin sähkö on halvempaa.

Kaikki tutkitut tapaukset on eritelty oheisessa taulukossa.

Sekä vuoden 1980 että 1985 tilanteissa havaittiin, ettei Roihuvuoren säiliötä saada täyttymään ilman säätöä (liitteet 33 ja 34). Lisäksi Roihuvuoren säiliö tyhjenee liikaa vuoden 1985 mitoitus-tilanteen mukaan.

Tutkimuksen toisessa vaiheessa selvitettiin erilaisia säätöventtiilimahdollisuuksia Roihuvuoren säiliön täyttämiseksi. Myllypuron säiliöön johtavaa putkea 957-705 kuristettiin siten, että se vastasi läpimitaltaan 600 mm:n ja pituudeltaan 1500 mm:n putkea. Myllypuron säiliötä siis tavallaan siirrettiin kauemmaksi Vanhankaupungin korkeapainepumppaamolta Roihuvuoren säiliön imun parantamiseksi.

Vuoden 1980 tilanteessa säiliöt toimivat melko hyvin (liite 35), mutta vuonna 1985 Roihuvuoren säiliö tyhjeni kokonaan (liite 36).

Koska mainittu säätö toimi hyvin säiliöiden täyttövaiheessa (klo 21 - 7), päätettiin kuristus suorittaa vain tänä aikana, jottei se häiritsisi Myllypuron säiliön tyhjenemistä. Samalla nostettiin myös vesisäiliöiden pinnan ohjaamien pumppujen käynnistysrajoja, jottei Roihuvuoren säiliö tyhjenisi liikaa. Tällä järjestelyllä saatiin säiliöt toimimaan erittäin hyvin vuonna 1980 (liite 37) sekä tyydyttävästi vuonna 1985 (liite 38).

Vuoden 1990 tilannetta lähdettiin tutkimaan samanlaisesta putkeen 957-705 asennetusta säätöventtiilistä. Täten ei kuitenkaan enää päästy tyydyttävään tulokseen, vaan Roihuvuoren säiliön pinta laski

HELSINGIN ITÄISTEN JA KOILLISTEN ALUEIDEN VEDEN JAKELU

Tutkitut tapaukset vuosina 1980, 1985, 1990

	1980 Ilman kuristus- säättöä (AJ0 17.11.75)	1985 Ilman kuristus- säättöä (AJ0 18.11.75)	1980 Kuristus klo 7-7 957-705 $\phi = 0,6$ L = 1500 (AJ0 24.11.75)	1985 Kuristus klo 7-7 957-705 $\phi = 0,6$ L = 1500 (AJ0 27.11.75)
Pumppujen säätö ja käyntiaika:				
VK 4 (6032) 700 l/s	TS 7-7 7-7	TS 7-7 7-7	TS 7-7 7-7	TS 7-7 7-7
VK 5 (6034) 700 l/s	- -	PS 705 65,5-70,8 PS 708 64,5-70,0 13.50-3.50	- -	PS 705 65,5-70,8 PS 708 64,5-70,0 11.40-6.10
VK 6 (6033) 400 l/s	TS 7-21 7-21	TS 7-21 7-21	TS 7-21 7-21	TS 7-21 7-21
VK 7 (6031) 500 l/s	PS 705 65,5-70,8 PS 708 64,5-70,0 21.20-3.50	PS 708 63,5-64,3 15.50-0.30	PS 705 65,5-70,8 PS 708 64,5-70,0 20.40-5.50	PS 708 63,5-64,3 19.10-0.20
MP 1 (623 P) 90 l/s	PS 706 85,3-88,3 8.30-7	PS 706 85,3-88,3 8.30-7	PS 706 85,3-88,3 9.30-12.40, 19.30-23.50 3.30-5.40	PS 706 85,3-88,3 8.40-23.50, 1.50-5.40
MP 2 (623 F) 210 l/s	PS 706 84,8-86,8 9-11,15,30-16,50, 19-7	PS 706 84,8-86,8 8,50-1,10, 2,30-3,30	PS 706 84,8-86,8 9,50-10,50, 19,50-22,50	PS 706 84,8-86,8 8,50-11,50, 19,50-23,50
MP 3 (623 B) 210 l/s	TS 7-24, 5-7 7-24, 5-7	TS 7-24, 5-7 7-24, 5-7	TS 7-24, 5-7 7-24, 5-7	TS 7-24, 5-7 7-24, 5-7
kWh klo 7-21	13127 (61,6 %)	17695 (64,3 %)	12916 (60,4 %)	17309 (62,1 %)
kWh klo 21-7	8194 (38,4 %)	9850 (25,7 %)	8440 (39,6 %)	10546 (37,9 %)
Sähkön hinta mk/vrk	2493	3265	2483	3267
Huomautuksia	708 ei täyty	708 tyhjenee liikaa (+61,8), eikä täyty	tyyydyttävä	708 tyhjenee kokonaan
Säiliökäyrät liitteenä	33	34	35	36

1980	1985	1990	1990	1990
Kuristus klo 21-7 957-705 $\phi = 0,6$ L = 1500 (AJ0 27.11.75)	Kuristus klo 21-7 957-705 $\phi = 0,6$ L = 1500 (AJ0 8.12.75)	Kuristus klo 20-7 957-705 $\phi = 0,6$ L = 1500 (AJ0 27.11.75)	Kuristus klo 7-7 958-957 $\phi = 0,6$ L = 2000 (AJ0 10.12.75)	Kuristus klo 7-7 958-957 $\phi = 0,6$ L = 1000 (AJ0 10.12.75)
TS 7-7 7-7	TS 7-7 7-7	TS 7-7 7-7	TS 7-7 7-7	TS 7-7 7-7
-	PS 705 65,5-70,8 PS 708 65,0-70,0 12.20-4.30	PS 705 65,5-70,8 PS 708 64,5-70,0 10.50-7	PS 705 65,5-70,8 7-7	PS 705 65,5-70,8 7-7
TS 7-21 7-21	TS 7-21 7-21	TS 7-21 7-21	TS 7-24 7-24	TS 7-24 7-24
PS 705 65,5-70,8 PS 708 64,5-70,0 21.10-7	PS 708 64,5-64,8 14.00-0.10	PS 708 64,5-64,8 12.30-0.10	PS 708 64,5-64,8 7-7	PS 708 64,5-64,8 7-7
PS 706 85,3-88,3 9.40-13.50, 19.20-23.40 3.40-6.40	PS 706 85,3-88,3 8.20-23.50, 2.50-7	PS 706 85,3-88,3 8.40-0.20, 2.20-5.40	PS 706 85,3-88,3 8.50-11.50, 19 - 23.15 3.40-6.30	PS 706 85,3-88,3 8.40-12.10, 19.15-23.20 3.20-6.30
PS 706 84,8-86,8 19,30-22,50	PS 706 84,8-86,8 8,50-11,50 20,20-22,50	PS 706 84,8-86,8 9-12,10, 18,50-23,20	PS 706 84,8-86,8 9,10-10,40, 19,15-22,20	PS 706 84,8-86,8 9-10,50, 18,30-22,30
TS 7-24, 6-7 7-24, 6-7	TS 7-24, 6-7 7-24, 6-7	TS 7-24, 5-7 7-24, 5-7	TS 7-24, 6-7 7-24, 6-7	TS 7-24, 6-7 7-24, 6-7
12756 (59,5 %)	18180 (64,9 %)	19526 (63,8 %)	20702 (63,2 %)	(n. 63 %)
8683 (40,5 %)	9821 (35,1 %)	11074 (36,2 %)	12043 (36,8 %)	(n. 37 %)
2480	3331	3620	3862	3942
hyvä	tydyttävä	708 tyhjenee kokonaan	705 ja 708 tyhjenevät liikaa (+62,6 ja +62,8)	hyvä
37	38	39	40	41

liian alas sekä tyhjeni lopulta (liite 39). Vaikeutena oli saada säiliöt tyhjentymään tyydyttävästi, täyttäminen sen sijaan onnistui edelleen suhteellisen hyvin.

Säätöventtiilin paikka muutettiin välille 942-958. Venttiili kuvattiin putkena, jonka läpimitta oli 600 mm sekä pituus 2000 m. Paikka osoittautui kuitenkin vääräksi nostokorkeuden Vanhankaupungin pumpptaamoissa noustessa liian suureksi. Kummassakaan säiliössä ei vesi riittänyt, vaan ne tyhjenivät.

Säätöventtiili siirrettiin välille 958-957 eli Myllypuron ylemmän säiliön piiriin johtavan pumpptaamon sekä alempaan säiliöön haarahtuvan johdon väliin (läpimitta 600 mm, pituus 2000 m). Säätö oli sama koko vuorokauden ajan. Säiliöt toimivat muuten tyydyttävästi, mutta kummankin pinta laski liian alas (liite 40).

Korkeapainepumppujen nostokorkeuden pienentämiseksi eli pumpatun vesimäärän lisäämiseksi vähennettiin venttiilin kuristusta puoleen ($\varnothing = 600$ mm, $L = 1000$ m) muuttamalla muita lähtöarvoja. Saavutettua tulosta voidaan pitää säiliöiden toiminnan kannalta tyydyttävänä (liite 41).

Säätöventtiilien käyttö Myllypuron säiliön läheisyydessä sai aikaan sen, ettei MaTaPuPu-alueella ollut painevaikeuksia edes vuoden 1990 mitoitustilanteessa, joten pelkästään tämän alueen painetilanteen vuoksi ei laskelman perusteella tarvittaisi MaTaPuPun säiliötä vielä v. 1990. Säiliötilavuuden tarvetta on kuitenkin tarkasteltava eri tekijöiden muodostamana kokonaisuutena (ks. kohta 5.44) ja toteuttamisen ajoitus suoritettava sen mukaisesti. Laajasalossa (solmu 491) oli painevaikeuksia vuosien 1985 sekä 1990 mitoitustilanteissa, mutta ne korjaantuvat sillä, että välillä 961-434 olevan $\varnothing = 300$ mm putken rinnalle rakennetaan jo rakentamisohjelmassa oleva $\varnothing = 400$ mm putki (pituus n. 600 m), jolloin Roihuvuoren säiliön vaikutus Laajasalossa tulee paremmin esille.

Vuosaareen johtavat säätöventtiilit 801-801 S sekä 802-802 S jou-

duttiin jo vuoden 1980 tilanteessa muuttamaan Vuosaaren säiliön (707) vedenpinnan mukaan toimiviksi siten, että ne avautuvat täysin vedenpinnan laskiessa tasoon +59.50 sekä sulkeutuvat normaaliasentoonsa (801 S 25 % auki sekä 802 S 10 % auki) säiliön pinnan saavuttaessa tason +63.80. Kuva vuoden 1990 tilanteesta on liitteenä 42.

5.44 Yhteenveto

Yhteenvetona suoritetusta itäisten ja koillisten kaupunginosien vedenjakelua koskeneesta laskennasta voidaan todeta, että 1980-luvun alkuvuosina on putkeen 958-957 asennettava uutena elementtinä kauko-ohjattu läppäsulku, jotta Myllypuron ja Roihuvuoren säiliöt saadaan toimimaan yhdessä. Huippukulutuksen aikana joudutaan sululla kuristamaan johtao 958-957 sekä säiliöiden täyttö- ja tyhjennysvaiheessa eli ympäri vuorokauden. Pienemmän kulutuksen aikana riittää kuristus vain täyttövaiheessa eli yöllä.

Lisäksi on rakennettava 1980-luvun alussa $\varnothing = 400$ mm johto välille 961-434 Laajasalon painevaikeuksien välttämiseksi. Vuonna 1985 tulisi laskelmien mukaan eteen tilanne, jolloin Vanhankaupungin kaikki neljä nykyistä pumppua olisivat huippukulutuksen aikana käynnissä, jos MaTaPuPun säiliötä ei ole.

Suoritetuista laskelmista saatujen tulosten mukaan MaTaPuPu-alueen painetilanteen vuoksi ei sinne tarvittaisi vesisäiliötilavuutta vuoteen 1990 mennessä, vaan jo rakentamisohjelmassa olevien pääjohtojen vaikutus painetasoihin on riittävä. Tähän vaikuttaa myös osaltaan suoritettu kuristussäätö, joka nostaa painetasoa pumppaamalla ja täten myös MaTaPuPu-alueella, jolla tarvittava painetaso on alhaisempi kuin Myllypuron ja Roihuvuoren säiliöiden alueella. Samalla on haittapuolena otettava huomioon kuristussäädön energiakustannuksia lisäävä vaikutus (ks. edellä esitetty taulukko eri tapauksista). Säiliötilavuuden tarvetta onkin tarkasteltava kokonaisuutena, johon vaikuttaa kulutusalueen painetilanteen ohella myös kulutusvaihteluiden tasaamistarve sekä veden varastointitarve

esim. palon sammutusta ja vuotoja varten samoin kuin myös vaikutukset viereisissä painepiireissä, tässä tapauksessa Myllypuron ja Roihuvuoren säiliöpiireissä. Kulutusvaihteluiden tasaamisella puolestaan voidaan pienentää pääjohtojen kuormitusta ja tasata korkea-painepumppaamon käyttöä. Lopullinen ratkaisu onkin tehtävä hakemalla kaikkien edellä mainittujen tekijöiden vaikutuksen taloudellinen optimi. Niinpä MaTaPuPun säiliönkin ajoitus on vielä erikseen määriteltävä ja harkittava ottaen huomioon myös ne seikat, joita tässä tarkastelussa ei ole tarkemmin selvitetty.

5.5 Näkökohtia ohjelman käytöstä tutkituissa tapauksissa

5.51 Putkirikko

Ohjelman seuraavien ominaisuuksien vuoksi on johtorikon tutkiminen normaalilaskentana vaikeaa:

- Kulutettuihin vesimääriin ei voida vaikuttaa, vaikka ohjelmassa painetaso kulutuspiisteessä laskisi tuntuvasti (jopa negatiiviseksi). Ohjelma siis tavallaan hukkaa vettä todellisuuteen nähdessä.
- Vaikka vesisäiliö olisi täysin tyhjentynyt, virtaa sieltä ohjelman mukaan vettä, mikäli ympäristön painetaso on vesisäiliön pohjaa alempana. Tässä ohjelmassa siis tulee verkostoon sellaista vettä, jota ei ole olemassakaan.

Mainitut seikat aiheuttavat sen, että tulokset eivät ole täysin luotettavia, vaan ainoastaan suuntaa antavia. Esimerkiksi virtaus-suuntien muutokset eivät kaikkialla tule todellisuutta vastaavasti näkyviin, koska ohjelma tyydyttää joka tapauksessa normaalit lähtötietoina annetut kulutukset. Todellisuudessa painetasojen laskiessa vuotovesimäärä ja kulutus vähenevät asteittain. Luotettavien tulosten saaminen edellyttää kulutuskuvioiden muuttamista todellisesta vastaaviksi (painetason muutoksen vaikutuksen huomioimista kulutuksessa).

Ohjelman mukaan putkirikko ei esimerkiksi aiheuttanut muutoksia virtaussuuntiin Puotinharjussa (putkissa 948-453 ja 453-451) eikä eteläisillä alueilla (Herttoniemi, Laajasalo), mikä aiheutui juuri ohjelman ominaisuudesta tyydyttää kulutukset kaikkialla. Todellisessa vuototilanteessa näilläkin alueilla olisi odotettavissa virtaussuuntien muutoksia.

5.52 Itäisten ja koillisten alueiden vedenjakelu

Vedenjakeluverkon eri elementtien (putket, venttiilit, pumput, säiliöt) suunnittelussa ohjelmaa voidaan käyttää tehokkaasti hyödyksi:

Tutkittaessa Helsingin itäisten ja koillisten alueiden vedenjakelua vuosina 1980, 1985 ja 1990 (kohta 5.4) saatiin säiliöiden vesipintojen sekä painetasojen muutoksista eri vaihtoehdoissa selvä kuva.

Kahden samassa painepiirissä sijaitsevan säiliön (Myllypuro 705 sekä Roihuvuori 708) vedenpintojen muutokset voitiin erittäin havainnollisesti saada halutunlaisiksi erilaisia säätövaihtoehtoja kokeilemalla.

Ohjelman energiakustannuksia laskevan ominaisuuden ansiosta oli pumppujen ja venttiilien säätöjä suunniteltaessa mahdollista samalla pyrkiä myös mahdollisimman taloudellisiin ratkaisuihin.

6. SOVELLUSESIMERKKIEN YHTEYDESSÄ SAADUT KÄYTTÖKOKEMUKSET

6.1 Yleiskokemukset

Case-tapausten yhteydessä havaittiin, että kumpikin käsitelty tapaus voitiin kuvata simulointimallilla. Saatujen kokemusten perusteella todettiin, että ohjelma on riittävän laaja Suomen oloihin ja tuskin minkään vesilaitoksen erityispiirteet estävät ohjelman käyttöä. Esimerkkien yhteydessä havaittiin, että mallin avulla voidaan kuvata hyvinkin monimutkaisia säätöjärjestelmiä sekä tutkia luotettavasti niiden erilaisia säätötapoja.

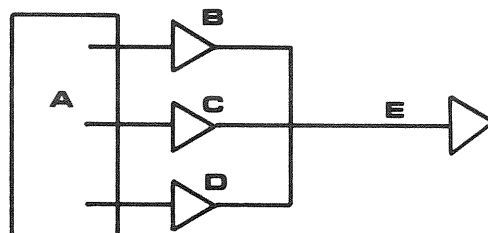
Erityistä huomiota ohjelman käytössä on kiinnitettävä annettujen alkuarvojen oikeellisuuteen. Tässä suhteessa merkittävimpiä ovat tiedot kulutuksista, pumppukäyristä sekä karkeuskertoimista. Pumppukäyrät on yleensä aiheellista määrittää itse paikalla samoin kuin kulutusarvot ja -vaihtelut. Näitä varten on tehtävä kenttäohjelma.

Yleisohjeena järjestelmän kuvauksessa mallin avulla voidaan sanoa, että kuvaus tulisi tehdä mahdollisimman paljon todellisuutta vastaavaksi. Mieleen tulevia oikoteitä tai niksejä ei tulisi käyttää, koska kokemusta vailla oleva käyttäjä saattaa silloin joutua hyvinkin hankalien ongelmien eteen.

Esimerkeistä havaittiin, että tulosten oikeellisuudessa ei ole moittimista, ts. ohjelma laskee sille annetun tehtävän oikein.

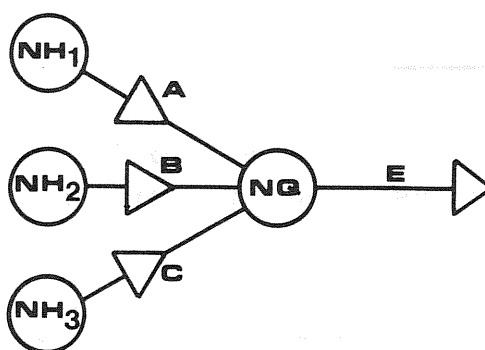
6.2 Pumppaamojen kuvaus

Kuvassa 14 on esitetty kaavamaisesti tyypillinen pumppaamo.



Kuva 14. Pumppaamon kaavamainen esitys. A = imuallas, B, C ja D ovat pumppuja ja E = syöttöjohto verkostoon.

Mallin avulla esitetään kuvan 14 pumppaamo kuvassa 15 esitetyllä tavalla. Imuallasta ei voi kuvata yhden NH-tyyppisen solmun avulla, jos pumppujen lukumäärä on suurempi kuin yksi. Jokainen pumpu tarvitsee siis oman alkusolmunsa ja kaikki alkusolmut ovat keskenään identtisiä (kukin kuvaa samaa pumppaamon imuallasta).



Kuva 15. Pumppaamon kuvaus mallin avulla. $NH_{1,2,3}$ ovat NH-tyyppisiä solmuja. A, B ja C ovat pumppuja, NQ on apusolmu ja E = syöttöjohto verkostoon.

Mainittu menettely on tarpeen siksi, että kullakin pumpulla on oltava toisistaan poikkeava määrittely (elementit määritellään mallissa päätesolmujen avulla), jotta niitä voidaan erikseen säätää, so. säätöohjeissa kyetään tunnistamaan kukin pumpu. Kuvauksessa käytettävä apusolmu NQ on solmu, jolla ei ole kulutusta.

Erityistä huomiota pumppaamojen kuvauksessa tulisi kiinnittää pumppukäyrien oikeellisuuteen. Pumppukäyrät on varmintä mitata itse paikalla, jolloin saavutetaan myös se etu, että pumppaamon sisäisen putkiston virtausvastus tulee huomioon otetuksi pumppukäyrän yhteydessä.

Pumppukäyrät tulee laskea mitatun tai valmistajan ilmoittaman aineiston perusteella käyttäen pienimmän neliösumman menetelmää. Ohjelmassa pumpun tuotto lasketaan kaavan 1 avulla

$$Q = (-B \pm \sqrt{B^2 - 4A(C - \Delta H)}) / 2A \quad (1)$$

ΔH = pumpun nostokorkeus

Q = pumpun tuotto

A, B, C ovat pumppuparametreja

Jos neliöjuurilausekkeen arvo on $= 0$, niin ohjelma sijoittaa Q :n arvoksi nollan. Näin voi käydä esim. silloin, jos pumppukäyränä annetaan tietynlainen suora. Tällöin myös ohjelman normaali toiminta häiriintyy. Tämän vuoksi onkin suositeltavaa, että pumppukäyrät annetaan sellaisina kuin ne todellisuudessa ovat. Asia on tärkeä sekä ohjelman että mallin hydraulisen toimivuuden kannalta.

6.3 Venttiilin kuvaus

Venttiilin virtausvastusta voidaan hydraulisesti pitää kertavastuksena, jolloin virtausvastus on riippuvainen virtaaman toisesta potenssista.

Ohjelmassa käytetään johtovirtaaman ja painehäviön riippuvuutta kuvaamaan kaavaa 2

$$\Delta H = RQ^\alpha, \quad \text{missä} \quad (2)$$

ΔH = painehäviö johdossa

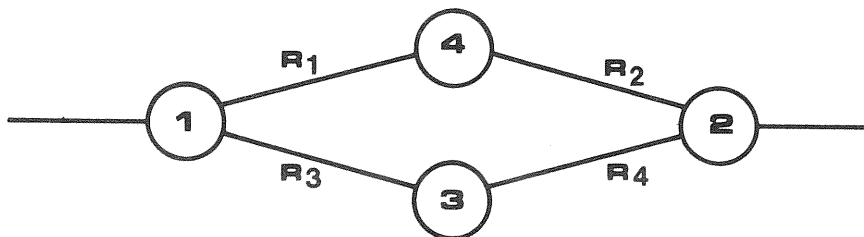
R = putkivastus

$\alpha = 2$, jos kyseessä Colebrookin painehäviökaava

$\alpha = 1.85158$, jos kyseessä on Hazen-Williamsin painehäviökaava

Myös venttiili voidaan kuvata tällaisena johtona. Tällöin on putkivastus R valittava siten, että kaava 3 noudattaa kyseisen venttiilin ominaiskäyrää. Käytettäessä Hazen-Williamsin kaavaa ei päästä aivan täsmälliseen kuvaukseen, mutta α :n poikkeavuus 2:sta on niin pieni, ettei sillä ole käytännön merkitystä.

Säätöventtiili voidaan kuvata kuvan 16 esittämällä tavalla.



Kuva 16. Kuvassa säätöventtiili solmujen 1 ja 2 välillä.
 $R_1 \dots 4$ ovat johtovastuksia.

Kuvasta 16 havaitaan, että vesi voi kulkea solmujen 1 ja 2 välillä kahta eri tietä, jolloin yhteenlasketut johtovastukset ovat $R_1 + R_2$ ja $R_3 + R_4$. Näin saadaan solmujen 1 ja 2 välille kaksi erilaista virtausvastusta, jotka vastaavat säätöventtiilin kahta eri asentoa. Haluttu vaihtoehto saadaan käyttöön säätöjärjestelyn avulla. Johtoja 1 ja 2 säädetään samanaikaisesti samoin johtoja 3 ja 4 siten, että vesi virtaa jommankumman johtoyhteyden kautta. Jos halutaan säätöventtiilille useampia toimintapisteitä niin lisätään apusolmujen ja johtoparien määrää.

6.4 Muiden laitteiden kuvaus

Muut laitteet, so. yksisuuntaventtiili, paineenalennusventtiili sekä vakionostokorkeudella toimiva pumppu kuvataan siten kuin ohjelman käytön oppaassa on esitetty.

Niiden toiminnassa ei havaittu mitään puutteita esimerkkitapauksia laskettaessa, lukuun ottamatta vakionostokorkeudella toimivaa pumppua. Tämän laitteen yhteydessä saattoi käydä niin, että vastapaine nousi korkeammalle kuin vakionostokorkeus oli ja vesi virtasi väärään suuntaan pumpun läpi. Laitteeseen ei siis ole ohjelmateknisesti rakennettu takaiskuventtiiliä. Takaisinvirtaus aiheuttaa virheellisiä lopputuloksia, koska koko ohjelman toiminta saattaa häiriintyä. Tämän vuoksi vakionostokorkeudella toimivien pumppujen käyttöä ei suositella ellei käyttäjä ole aivan varma siitä, että takaisinvirtausta ei voi tapahtua.

6.5 Järjestelmän säädön kuvaus

Mallin avulla voidaan kuvata kahdella tavalla ohjattuja säätöjä: paineen ja ajan mukaan tapahtuvia säätöjä.

Paineen mukaan ohjattavalla säädöllä ymmärretään elementin ohjausta jonkin tietyn vesisäiliön vedenpinnan korkeusvaihtelujen mukaan. Säätöelementti voi olla kahdessa erilaisessa tilassa. Säätöohjeeksi annetaan jonkin vesisäiliön kaksi vedenpinnan korkeutta, joita

ylitetessä tai alitettaessa elementin tila määräytyy. Säiliön vedenpinnan ollessa säätörajojen välissä elementti voi olla jommassa kummassa säätötilassaan.

Esimerkkitapauksia laskettaessa havaittiin seuraavanlaisia mahdollisuuksia ohjelman kannalta virheellisen tilanteen syntyyn:

- ylärajan numeerinen arvo oli pienempi kuin alarajan
 - elementin alkutilan ja alkuarvona annetun vesisäiliön vedenpinnan korkeuden pitää katkaisurajojen kanssa sopia yhteen
 - säiliön alkuarvona annettu vedenpinnan korkeus ei saa olla sama kuin katkaisuraja
 - katkaisurajat eivät saa olla liian lähellä toisiaan
- Välin suuruus riippuu siitä, kuinka nopeasti säiliön vedenpinta vaihtelee.

Ohjelmassa on myös mahdollisuus ohjata elementtiä kahden tai useamman säiliön avulla. Esimerkiksi, jos jonkin säiliön katkaisuraja ylitetään, niin säätö tapahtuu. Tässä yhteydessä on kuitenkin varottava sellaisia tilanteita, joissa eri säiliöiden määrittämät säätötilat olisivat ristiriidassa keskenään. Jos näin käy ajo päättyy virheellisenä.

Säädettäessä elementtiä ajan mukaan ilmoitetaan elementin säätötilat sekä niiden alkamis- ja loppumisajankohdat. Elementin alkutilan tulee simuloinnin alkaessa sopia yhteen simuloinnin alkamisajankohdan ja säätöohjeiden kanssa. Ajan mukana suoritettussa säädössä päädytään virheelliseen laskentatilanteeseen, jos:

- simuloinnin alkamisajankohta on sama kuin säätöaika
- simuloinnin alkamisajankohta on säätöaikojen välissä. Tämä edellyttäen, että säädön loppuaika on ennen simuloinnin loppumisajankohtaa.

Joissakin tapauksissa ohjelmalla pystytään kuvaamaan myös sekä ajan että paineen mukaista säätöä. Tämä tapahtuu siten, että määritellään kaksi peräkkäistä elementtiä, joissa toista ohjataan paineen ja toista ajan mukaan. Oletetaan esimerkiksi, että jonkin pumpun

pitää olla käynnissä klo 14.00 - 18.00 ja ohjautua tällöin jonkin vesitornin pinnankorkeuksien mukaan. Tapaus kuvataan siten, että kyseisen pumpun perään asetetaan sulkuventtiili, jolla on ajanmukainen säätö (avoinna vain klo 14.00 - 18.00) ja tällä pumpulla on haluttu paineenmukainen säätö. Venttiilin ollessa kiinni pumpun virtaamaksi tulee nolla.

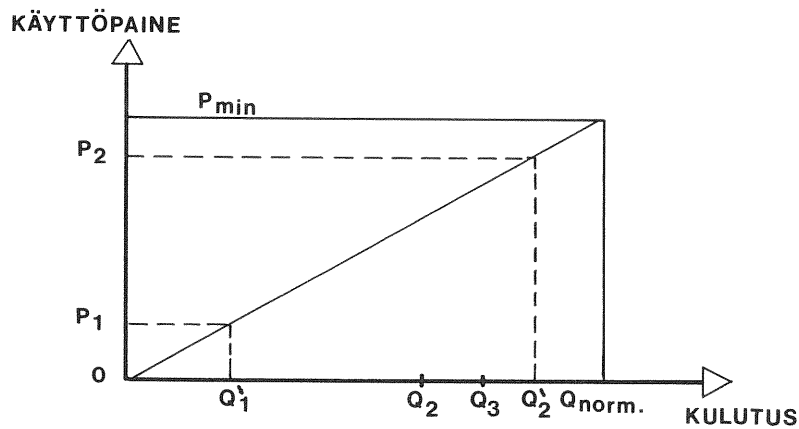
6.6 Ohjelmassa havaittuja erikoispiirteitä

Tutkittaessa Helsingin jakelujärjestelmän suunnittelun yhteydessä putkirikon aiheuttamaa vuotoa havaittiin, että ohjelma tyydyttää aina kullekin solmulle määritellyt kulutukset eli vaikka solmun painetaso on negatiivinenkin, niin solmulla on edelleen kulutusta. Näin ei tietenkään voi käytännössä tapahtua. Seikka johtuu siitä, että ohjelman formuloinnissa ei ole otettu huomioon kulutuksen riippuvuutta käyttöpaineesta. Tämän riippuvuuden huomioonotto aiheuttaisi ohjelmaan laajoja muutoksia. Ohjelma siis pitää kulutukset aina alkuarvojen mukaisina.

Koska normaalitilanteissa käyttöpaineen vaikutus kulutukseen on vähäinen, niin tätä muutosta ohjelmaan ei ole tehty. Jos mallin avulla tutkitaan sellaisia tapauksia, joissa paine huomattavasti laskee (esim. putkirikkoja) niin suositellaan kyseisten solmujen kulutusten muuttamista siten, että paine ja kulutus vastaavat toisiaan. Paineen ja kulutuksen välillä voidaan olettaa lineaarinen riippuvuus siten, että jos paine on nolla niin kulutus on nolla ja jos paine on yhtä suuri tai suurempi kuin minimiarvo niin kulutus on normaali. Mainittujen painearvojen välillä kulutuksen suuruus muuttuu siis lineaarisesti. Kulutuksen arvioinnissa voidaan käyttää esim. kuvan 17 mukaista järjestelyä.

Käytettäessä normaalia kulutusta Q_n on tulokseksi saatu paine P_1 . Tätä vastaava kulutus on Q_1' . Oikean kulutuksen täytyy olla välillä Q_1' ja Q_n esim. $Q_2 = (Q_1' + Q_n)/2$. Voidaan olettaa, että käyttämällä kulutusta Q_2 , tulokseksi saadaan paine P_2 ja sitä vastaava kulutus on Q_2' . Uusi kulutus voidaan jälleen arvioida samalla ta-

valla $Q_3 = (Q_2 + Q_2')/2$. Prosessia jatketaan kunnes riittävä tarkkuus on saavutettu.



Kuva 17. Paineen ja kulutuksen keskinäinen riippuvuus.
Lähempi selostus edellä olevassa tekstissä.

Helsingin putkirikotapausta tutkittaessa havaittiin, että mallissa vesisäiliöstä saattaa virrata vettä myös säiliön ollessa tyhjänä silloin, kun ympäristön painetaso on jatkuvasti säiliöpohjan korkeutta alempana. Tämä aiheutuu ohjelman rakenteesta, sillä säiliöt eivät ole ohjelmassa automaattisesti sulkuventtiilisiä. Asia voidaan ehkäistä asettamalla vesitornin ja verkoston väliseksi elementiksi johto/yksisuuntaventtiili, jota säädetään siten, että vettä ei voi virrata säiliöstä säiliön tyhjennyttyä ja toisaalta säiliö voi täyttyä kun tilanne palautuu normaaliksi.

Ohjelman erityispiirteenä voidaan pitää myös sellaista tapausta, jossa kulutus tulee negatiiviseksi. Tämä johtuu siitä, että LC- ja LS-tyyppiset kulutuskuviot aproksimoidaan ohjelmassa käyrän avulla. Jos kulutuskuviossa on voimakkaita vaihteluja, niin sitä vastaavan käyrän arvo saattaa tulla negatiiviseksi. Tämä voidaan välttää käyttämällä ES-tyyppistä kulutuskuviota, jos voimakkaita kulutusvaihteluita on tarpeen kuvata.

6.7 Tietokoneajon suoritus ohjelmalla

Ennen varsinaista tietokoneajojen suoritusta tulisi käyttäjän tarkastaa huolellisesti alkuarvot, sillä tämä säästää useinkin myöhemmässä vaiheessa aikaa ja rahaa. Ennen ajoja käyttäjän tulisi myös tarkastaa käytettävissä olevan ohjelmaversion taulukkodimensioiden riittävyys. Tämä on erittäin tärkeää siksi, että jos jokin taulukkoraja ylitetään niin syntyy virheellinen tulos, jota on joskus vaikea paikallistaa.

Alkuarvojen manuaalisen tarkastuksen jälkeen suoritetaan ohjelman avulla alkuarvojen testaus. UNIVAC 1108-tietokoneella tämä onnistui aina J-prioriteetilla, so. suurimmalla prioriteetilla (maksimi kok.aika J-prioriteetilla on 30 s.). Alkuarvojen tarkastusajoja joudutaan yleensä suorittamaan useita, jotta lävistys- yms. virheet saadaan korjatuiksi.

Kun kaikki lähtötietojen muodolliset virheet on korjattu, tarkastetaan vielä niiden asianmukaisuus. Tämä tapahtuu suorittamalla 1...2 tunnin mittainen simulointi ja tarkastamalla saatujen tulosten oikeellisuus. Kun alkuarvojen muodollinen ja asianmukainen tarkastus on tehty, voidaan siirtyä suorittamaan täysimittaisia simulointiajoja.

6.8 Ratkaisun konvergenssi

Ohjelmassa on kaksi algoritmiä: NEWTON-RAPHSON ALGORITMI, joka ratkaisee verkon staattisen tilan ja PREDICTOR/CORRECTOR-ALGORITMI, joka huolehtii lähinnä säiliöiden vedenpinnan muutoksista simuloinnin aikana.

Esimerkkien laskennassa havaittiin, että NEWTON-RAPHSON iteraatio on suhteellisen nopea. Laskettaessa suurella verkolla, esim. Hel-

singin verkko (180 solmua), vaadittiin yhteen ratkaisuun 8...12 iteraatiokierrosta. Toisaalta taas verkon koko ei paljoa vaikuta iteraatiokierrosten lukumäärään (11-solmun malliverkkoa käytettäessä suoritettiin iteraatiokierroksia 5...7).

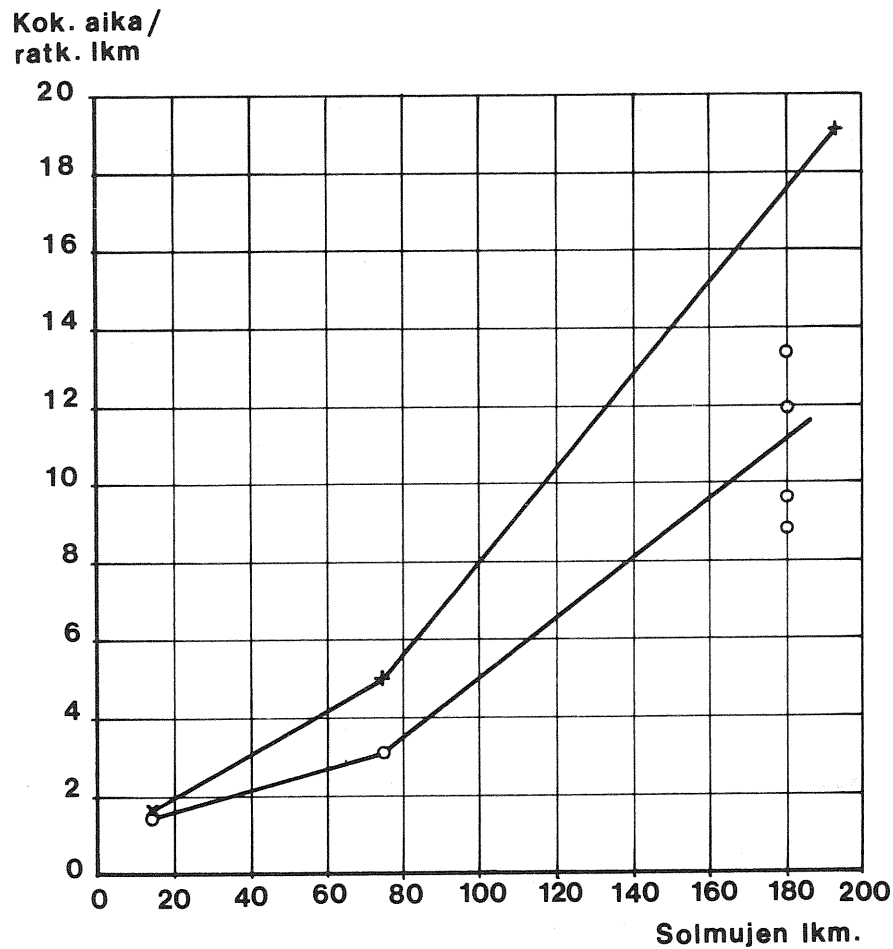
PREDICTOR/CORRECTOR-ALGORITMIN iteraatiokierrosten lukumäärä oli normaalisti 2...3, mutta siihen vaikuttavat monet eri tekijät kuten säiliöiden lukumäärä ja niiden koko, painepiirien lukumäärä, paineenkorotusten lukumäärä, simulointiaskeleen pituus jne. Näistä merkittävin lienee simulointiaskeleen pituus. Yleensä esimerkiksi tapausten laskennassa käytettiin yhden tunnin mittaista simulointiaskelta, jota suositetaan myös muille käyttäjille. Kun Helsingin esimerkkitapaus laskettiin käyttäen kahden tunnin mittaista simulointiaskelta, iteraatiokierrosten lukumäärä nousi huomattavasti ja ajosta tuli itse asiassa kalliimpi kuin tunnin mittaista simulointiaskelta käyttäen.

6.9 Laskentanopeus ja -kustannukset

Kuvassa 18 on esitetty laskenta-aika ratkaisua kohden solmujen lukumäärän funktiona.

Kuvasta havaitaan, että laskentanopeus riippuu lähes suoraviivaisesti solmujen määrästä. Samoin havaitaan, että Colebrookin painehäviökaavaa käyttäen ovat laskentakustannukset jonkin verran kalliimpia kuin Hazen-Williamsin painehäviökaavaa käytettäessä.

UNIVAC-1108 tietokoneella laskettaessa kustannukset ovat noin 1 mk/s. Täten esimerkiksi 100-solmuisen verkon simulointia, jossa on 30 ratkaisua ja jossa käytetään Hazen-Williamsin painehäviökaavaa vaatii laskenta-aikaa 150 s ja maksaa noin 150 mk.



Kuva 18. Laskentanopeuden riippuvuus solmujen lukumäärästä. Alempi käyrä on saatu käyttäen Hazen-Williamsin painehäviökaavaa ja ylempi käyttäen Colebrookin painehäviökaavaa.

6.10 Tarvittava muistikapasiteetti

WATSIM 2 on ns. segmentoitu ohjelma, koska se ei muutoin olisi mahtunut UNIVAC-1108 muistiin. Esimerkkiajojen yhteydessä käytettyjen versioiden suuruus vaihteli 54...57 kilosanen välillä. Oh-

jelman eri segmenttien vaatima muistitila on esitetty kuvassa 19.

IRANK DRAWN TO SCALE: 200 WORDS DECIMAL PER DASH

MAINS (4345)

```

-----
R* (410)
--
N* (506)
--
M* (2477)
-----
C* (994)
-----
L* (3556)
-----
D* (1779)
-----
K* (729)
-----
J* (789)
-----
I* (245)
-----
H* (534)
-----
E* (22)
-----
F* (1103)
-----
G* (778)
-----

```

DRANK DRAWN TO SCALE: 700 WORDS DECIMAL PER DASH

MAINS (16348)

```

-----
B* (4597)
-----
N* (14732)
-----
M* (31759)
-----
C* (13454)
-----
L* (8797)
-----
D* (466)
-
K* (199)
-
J* (311)
-
I* (127)
-
H* (233)
-
E* (605)
-
F* (835)
-
G* (93)
-

```

Kuva 19. Ohjelman eri segmenttien vaatima muistitila.

7. WATSIM 2-OHJELMAN SOVELTUVUUSALUE

7.1 Ohjelman edellyttämien lähtötietojen tarve ja hankintasuositus

Alkuarvona ohjelmalle on annettava jakelujärjestelmän putkien ja laitteiden fyysinen kuvaus. Tällä ymmärretään seuraavia seikkoja:

- johtojen pituudet, läpimitat ja karkeuskertoimet
- säiliöiden vedenpinnankorkeus-vesitilavuussuhde
- säiliöiden korkeusasema
- imualtaan korkeusasema
- pumppujen ja venttiilien ominaiskäyrät
- kulutuskuviot

Nämä tiedot ovat yleensä nopeasti saatavissa normaalin vesilaitostoiminnan yhteydessä lukuun ottamatta johtojen karkeuskertoimia, pumppujen ja venttiilien ominaiskäyriä sekä kulutuskuvioita.

Johtojen karkeuskertoimet pitää yleensä arvioida. Arviointiperusteena voidaan pitää johdon materiaalia ja ikää sekä kyseisen vesilaitoksen käytön yhteydessä saatuja tietoja (esim. putkirikkojen korjauksen yhteydessä voidaan arvioida ao. johdon karkeuskertoimen suuruutta). Arvioinnissa voidaan käyttää apuna myös jotain soveltuvaa tietokoneohjelmaa /19,14/.

Johtojen karkeuskertoimet voidaan tietysti myös mitata itse paikalla, mutta tätä on käytännössä hankala järjestää. Joissakin tapauksissa se on kuitenkin suositeltavaa esim., jos kalibrointiajon jälkeen on syytä epäillä jonkin johdon karkeuskertoimen poikkeavan huomattavasti arvioidusta ja tällä johdolla on suuri merkitys jakelujärjestelmän toiminnassa.

Pumppujen ja venttiilien ominaiskäyrät olisi aina mitattava itse paikalla. Pumppujen ominaiskäyrän mittaaminen käytännössä lienee järjestettävissä suhteellisen helposti. Jos mittauksia ei voida suorittaa, on ominaiskäyrät arvioitava valmistajan esitteen ja laitteen oletetun kulumisen perusteella.

Edelleen ohjelmalle on annettava kunkin solmun kulutustiedot kutakin simulointiaskelta varten. Kulutusalkuarvojen täsmällinen määrittäminen on vaikeinta alkuarvojen hankinnassa.

Kullakin kulutussolmulla voi olla erityyppisiä kulutuksia, esim. asutuksen, teollisuuden jne. kulutus. Kunkin erityyppisen kulutuksen suhteellinen kulutuskuvio tulisi määrittää mahdollisimman tarkasti. Kulutuskuvio voidaan määrittää esim. seuraavin tavoin:

- kuluttajalta itseltään saadaan tiedot (esim. teollisuuden kulutus)
- mitataan kulutuksen vaihtelu (saadaan lukemalla vesimittareita sekä pumpatun veden ja säiliöiden tyhjentymisen/täyttymisen avulla)
- arvioimalla kulutuskuvion muoto (perustuu entisiin kulutustietoihin)

Jos jonkin solmun erityyppisiä kulutuskuvioita ei voida määrittää, niin voidaan olettaa, että solmulla on vain yhdentyyppistä kulutusta, joka edustaa kaikkia solmun erityyppisiä kulutuksia.

Kun erityyppiset kulutuskuviot on määritetty, täytyy arvioida kulutusten keskimääräiset arvot. Keskimääräiset kulutustiedot saadaan kulutuskuvion määrittäksen yhteydessä, jos kyseessä on kuluttajan oma ilmoitus tai jos kulutuskuvio on mitattu. Muutoin joudutaan arvioimaan keskimääräinen kulutus. Arviointiperusteina voidaan käyttää yleisesti vesilaitostoiminnassa käytettyjä arviointiperusteita (esim. asukasluku, kerrosala, tuotannon volyymi jne.).

7.11 Kenttäkoejärjestely järjestelmän kalibroimiseksi

Verkkomallin kalibroimiseksi on yleensä tarpeellista suorittaa kenttäkokeita. Kenttäkoejärjestelyn avulla on tarkoitus selvittää seuraavia seikkoja:

- kulutuskuviot
- pumppujen käyntiajat ja säätötapahtumat
- pumppaamojen tuottamat vesimäärät kunakin ajanjaksona sekä pai-

- nekorkeus pumppaamalla
- säiliöiden vedenpinnan korkeusvaihtelut

Ennen kenttäkokeisiin ryhtymistä on itse koejärjestely suunniteltava mahdollisimman yksityiskohtaisesti. Koejärjestelyyn vaikuttavat paljon kunkin vesilaitoksen erityispiirteet sekä kenttäkokeisiin käytettävissä olevat resurssit kuten henkilöstö, laitteiden riittävyys jne.

Kenttäkokeiden suositeltava kesto aika on yksi viikko tai ainakin kolme vuorokautta, joista yksi on viikonlopun aikana.

Kulutuskuvioiden kenttämittaus suoritetaan siten, että järjestelmän kutakin erityyppistä kulutusta valitaan edustamaan jokin soveltuva alue esim. pientalo-, kerrostalo-, liiketaloalue jne. Kulutuksen suuruus eri vuorokaudenaikoina saadaan selville lukemalla vesimittareita kyllin usein, esim. tunnin tai 15 min:n välein. Saatuja kulutuskuvioita käytetään koko alueen kulutustyyppien kulutuskuvioina. Samalla päästään selville erityyppisten kulutusten keskimääräisistä arvoista.

Jos kulutuskuvioiden kenttämittausta ei voida suorittaa, niin niitä voidaan arvioida seuraavasti: määritetään esim. jonkin painepiirin kokonaiskulutuksen vaihtelu vuorokauden aikana ja annetaan näin saatu kulutuskuvio jokaisen mainitun painepiirin solmun kulutuskuvioksi. Tämän jälkeen arvioidaan kunkin solmun keskimääräinen kulutus siten, että kokonaiskulutus ja keskimääräisten kulutusten summa on yhtä suuri.

Kenttäkokeiden aikana on suositeltavaa mitata painetta jatkuvasti verkon eri osissa, jotta järjestelmän toiminnasta saadaan tarkka kuva. Painemittaukset voidaan suorittaa siirrettävien painemittareiden ja piirtureiden avulla.

Käyttöhenkilöstön on kenttäkokeissa kirjattava muistiin pumppujen käyntiajat, muut säätötapauhtumat, pumppaamojen tuottamat vesimää-

rät, painekorkeudet pumppaamoihin sekä vesisäiliöiden vedenpinnan korkeusvaihtelut.

7.2 Ohjelman soveltuvuusalueet

Ohjelmalla on kaksi pääasiallista soveltuvuusaluetta: jakelujärjestelmän uusien suunnittelutehtävien suoritus sekä nykyisen järjestelmän kalibrointi ja sen ohjauksen tehostus. Ohjelman avulla ei voida suoranaisesti suunnitella, vaan suunnitteluprosessi on yritys-erehdys-tyyppistä, jossa kokeillaan erilaisten suunnitelmavaihtoehtojen toimintaa.

7.21 Suunnittelu ohjelman avulla

Pääasialliset komponentit jakelujärjestelmän suunnittelussa ovat verkon, säiliövaihtoehtojen ja säädön suunnittelu, joita ei voi suorittaa kokonaan erillisinä. Tietyissä tapauksissa voidaan kuitenkin verkko ja säiliötilatarve suunnitella erillisinä esim., jos on päätetty, että tietyn suuruinen säiliö joka tapauksessa rakennetaan tai säiliötä ei rakenneta ollenkaan.

Ohjelman avulla voidaan tarkastaa verkoston vaihtoehtoiset laajennussuunnitelmat, jolloin tulokseksi saadaan kunkin vaihtoehdon painetasojen riittävyys sekä pumppauskustannusten suuruus. Tulosten perusteella valitaan paras vaihtoehto. Samalla tavalla voidaan suorittaa erilaisten valinnaisten säiliökokojen suunnittelua, jolloin tarkasteluun voidaan luonnollisesti liittää myös säiliön sijaintivaihtoehdot.

Säädön suunnittelu tapahtuu periaatteessa samoin kuin muukin suunnittelu: ohjelma tarkastaa eri suunnitteluvaihtoehdot ja tulosten perusteella voidaan laatia uusia, tarkempia vaihtoehtoja.

Lopullisesta säädön suunnitelmasta saadaan tulokseksi myös säätölaitteistotarve ja tarvittavien laitteiden pääasialliset tekniset parametrit, joiden avulla saadaan viitteitä laitehankintoihin.

7.22 Ohjelma käytön yhteydessä

WATSIM 2-ohjelman luontuvin sovellusalue on normaalin käytön yhteydessä.

Mallin avulla voidaan kalibroida jakelujärjestelmä, jolloin saadaan selville järjestelmän senhetkinen tilanne. Tulokseksi saadaan esim. varmuus kulutusoletuksien oikeellisuudesta, painetasot verkon eri osissa, virtaussuunnat ja -määrät eri johto-osissa, pumppaamojen käyttämän energian määrä ja sen jakauma eri ajanjaksoille sekä tiedot vesisäiliöiden käytöstä. Kahta viimeksi mainittua tulosta voidaan verrata jakelujärjestelmässä mitattuihin arvoihin ja näin saada tietoa kalibroinnin tarkkuudesta.

Ohjelman avulla voidaan tarkastella kyseisen jakelujärjestelmän vaihtoehtoisia ohjaustapoja. Vaihtoehtoisten ohjaustapojen yhteydessä on tarkasteltavana erityisesti energian kulutus sekä vesisäiliöiden käyttötavat. Ohjelman avulla suunnitellaan ohjaustapoja yritys-erehdys-menetelmällä. Vaihtoehtojen suunnitelmat tarkastetaan ohjelman avulla. Tulosten perusteella suunnitelmia voidaan vielä tarkentaa.

Ohjelman avulla voidaan tutkia myös poikkeuksellisia kulutustilanteita esim. sammutusveden ottoa ja putkirikkojen aiheuttamaa kulutusta. Poikkeuksellinen kulutus annetaan ohjelmalle kulutuksen alkuarvona, alkamis- ja loppumisajankohtineen. Tulokseksi poikkeuksellisen tilanteen vaikutukset voidaan arvioida:

- säiliötilan merkitys varmuusvarastona
- pumppureservin merkitys poikkeuksellisessa kulutustilanteessa
- painetasojen aleneminen verkon eri osissa
- virtaussuunnatien ja -määrien muuttuminen
- ohjeita säädön suorittamiseksi poikkeustilan aikana

Painetasojen aleneminen merkitsee yleensä jakelun palvelutason laskua esim. ylimmät kerrokset voivat jäädä kokonaan ilman vettä. Painetason laskun suuruuden perusteella voidaan arvioida kulutta-

jille koitunutta haittaa.

Virtaussuuntien ja -määrien muuttuminen saattaa aiheuttaa johtoveden samentumista (rautasakkakerros johtojen sisäpinnalta lähtee liikkeelle). Ohjelman tuloksia tutkimalla voidaan joissakin tapauksissa arvioida likaantumisen laajuutta sekä mahdollisesti tarvittavaa verkon huuhtelua, jonka avulla likaantumisen haitat saadaan poistetuiksi.

Ohjelman avulla voidaan suunnitella ns. palauttava säätö yksityiskohtaisestikin, joskin viitteet lienevät useimmiten riittäviä, koska mahdollisen häiriön suuruudesta ja kestosta ei ole käytettävissä varmaa tietoa. Todellisen poikkeuksellisen kulutustilanteen aikana WATSIM 2-ohjelmaa nykyisessä muodossaan ei voida ottaa käyttöön, vaan kulutustilanteiden tarkastelu on ennakoivaa ja suuntaa antavaa.

7.3 Ohjelman rajoitukset

Ohjelma laskee tulokset annetuista alkuarvoista, joiden on oltava mahdollisimman oikeita. Varsinkin kulutustietojen pitäisi olla tarkkoja, koska niiden virheellisyys vaikuttaa huomattavasti lopputuloksiin. Tässä suhteessa voidaan pitää ohjelman rajoituksena sitä, että osaa kulutustiedoista ei voida korvata vastaavilla, alkuarvoina annettuina solmupaineina. Tämän kaltainen mahdollisuus helpottaisi huomattavasti ohjelman käyttöä, koska paineiden kenttämittaukset on huomattavasti helpompi järjestää kuin vastaavien virtaamamittausten.

Ohjelman rajoituksena on myös se, että ohjelma ei sinänsä suunnittele mitään, vaan suunnittelu ohjelman avulla tapahtuu aina yrityser ehdys-menetelmällä. Suunnitteluun ohjelman avulla tulisi olla käytettävissä jokin systemaattinen lähestymistapa, jonka avulla suunnitteluvaihtoehtojen ja uusien tarkempien suunnitelmien tarkastelu etenisi mahdollisimman järkiperaisesti.

Ohjelman koko saattaa aiheuttaa vaikeuksia. Jos alkuperäisen version (tämän projektin tuloksena syntynyt versio) taulukkodimensiona joudutaan suurentamaan, saattaa esiintyä vaikeuksia muistitilan riittävyydestä. Tämä riippuu toisaalta paljon siitä, mitä taulukoita joudutaan laajentamaan. Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että ohjelman koko kasvaa, jos taulukoita muutetaan output-aliohjelmassa, koska se muodostaa segmentoituksessa suurimman segmentin. Tällaiset muistitilavaikeudet ovat hyvin konekohtaisia ja edellä esitetyt huomiot koskevat UNIVAC 1108-tietokonetta.

Ohjelmateknisenä hankaluutena voidaan mainita säiliödynamiikkaa laskevan algoritmin puutteet. Algoritmi on hidas, se tarvitsee 2...5 iteraatiokierrosta, jotta päädytään ratkaisuun. Toisaalta voi käydä niin, että iteraatio ei suppene ollenkaan ja silloin ohjelma käyttää turhaan sille varatun laskenta-ajan loppuun. Näin voi käydä, kun kaksi säiliötä on aivan vierekkäin (tällöin säiliöt pitää määritellä yhtenä), tai jos vettä kuluu verkossa enemmän kuin säiliöstä ja pumppaamoista voidaan toimittaa (algoritmi joutuu ratkaisemaan tavallaan mahdotonta tehtävää). Näiden korjaamiseksi olisi algoritmi laadittava uudelleen.

Samoin ohjelman säätöosa on jonkin verran puutteellinen. Sekä ajan että paineen mukainen säätö voidaan käsitellä vain poikkeustapauksissa. Nykyisellä säätöosalla voi kokenut käyttäjä tosin kuvata monimutkaisiakin säätöjärjestelyjä (vrt. Tuvesi-tapaus), mutta kehittyneempänä voitaisiin pitää sellaista järjestelyä, jossa säätöelementeille voitaisiin antaa useita erilaisia säätöstrategioita, ja näille määriteltäisiin sitten keskinäinen prioriteettijärjestys. Tämä vaatisi yhden uuden aliohjelman tekoa ohjelmistoon.

7.4 Vertailu muihin ohjelmiin

WATSIM 2:n etuna muihin vedenjakelujärjestelmää ratkaiseviin ohjelmiin nähden on ensisijaisesti se, että WATSIM 2:n avulla tarkastellaan vedenjakelujärjestelmän toimintaa 1...2 vuorokauden ajan ja säädön kuvaus on mahdollinen. Tästä johtuu, että säiliö-

tilan tarve, verkon laajennukset ja säädön suunnittelu voidaan tehdä aiempaa luotettavammin ja kokonaisvaltaisemmin.

Toisena merkittävänä etuna on se, että WATSIM 2:n avulla voidaan kuvata erillisiä säätöstrategioita, jotka sitten toteutuvat simuloinnin kuluessa. Tämä mahdollistaa säätöstrategioiden yksityiskohtaisen suunnittelun.

Vielä ohjelman etuna on pumppauskustannusten tarkka laskenta simulointiajanjakson aikana. Tämä mahdollistaa energiatalouden suunnittelun ja tuo esille erityisesti säädön vaikutuksen pumppauskustannusten ajalliseen jakaumaan.

Haittana muihin vastaaviin ohjelmiin verrattuna voi pitää sitä, että ohjelma ei mitoita esim. johtokokoja /4,15/. Myöskään ratkaisun herkkyyksianalyysiä ei ohjelman nykyisessä versiossa ole mahdollista suorittaa /14/.

7.5 Yhteenveto

Yhteenvetona WATSIM 2-ohjelman käyttöalueesta voidaan sanoa, että ohjelma soveltuu sekä uusien että olemassa olevien järjestelmien suunnitteluun. Ohjelman avulla voidaan suunnitella sekä verkkolajennuksia että säiliötilan suuruutta ja edelleen jakelujärjestelmän säätöä. Ohjelman avulla voidaan myös tarkastella jakelujärjestelmän käyttötaloutta.

Muihin ohjelmiin verrattuna WATSIM 2 on monessa suhteessa kehittyneempi ja käyttökelpoisempi. Tarkasteluajanjaksona on 1...2 vrk ja säädön kuvaus on mahdollinen. Toisaalta ohjelma ei mitoita eikä siinä ole ratkaisun sensitiivianalyysiä.

WATSIM 2 on arvokas lisä vedenjakelujärjestelmää laskeviin ohjelmiin.

8. JATKOTUTKIMUSTARVE

WATSIM 2:den jatkotutkimustarve ei ole suuri. Nyt käytettävissä oleva versio on tehokas apu suunniteltaessa vedenjakelujärjestelmän laajennuksia ja säätöä. Jos joitakin muutoksia ja parannuksia ohjelmaan tehdään, niin lähinnä voidaan ajatella seuraavia seikoja:

- säiliödynamiikka-algoritmin uudelleen formulointi
- säätöosan uudelleen formulointi
- ratkaisun sensitiivianalyysi
- kulutuksen esittäminen käyttöpaineesta riippuvana
- säiliöiden vedenpintojen vaihtelun graafinen tulostus

Nämä muutokset saattavat olla hyvinkin suuritöisiä eikä niiden kannattavuudesta voi olla varma.

Veden jakelujärjestelmien asteittain tarkentuvassa suunnittelussa ovat investointikustannusten säästämisen kannalta tärkeitä tutkimuskohteita suunnitteluvaihtoehtojen valinnan ja investointien ajoituksen perusteet. Ongelma on tyypillinen optimointitehtävä, jonka ratkaisua voidaan hakea mm. matemaattisen ohjelmoinnin keinoin. Vesisäiliötilavuuden, johtokokojen ja pumppujen kapasiteetin optimoinnissa on eräässä tutkimuksessa /10/ sovellettu lineaarista ja dynaamista ohjelmointia. Samat optimointimenetelmät soveltuvat myös investointien ajoituksen tutkimiseen. Lopullisen ratkaisun valintaan vaikuttavat paikalliset olosuhteet tulevat rajoitusehtoina otetuiksi huomioon.

Arvioitaessa vedenjakelujärjestelmän toiminnan luotettavuutta olisi tärkeää, että olisi käytettävissä jokin käytettävyyssimulointiin perustuva malli, jonka avulla jakelujärjestelmän käytettävyyys voidaan esittää numeerisesti. Esim. lähteessä /22/ on kuvattu tarkoitettunlainen malli ja lähteessä /21/ on esitetty Suomessa kerättyjä vedenjakelujärjestelmän luotettavuusparametreja, joihin perustuvana tarkastelu voitaisiin suorittaa.

Tarkasteltaessa kokonaisuutena vedenjakelujärjestelmän käyttöä voidaan havaita runsaasti avoimia kysymyksiä. Ainakin seuraavat selvitykset tulisi suorittaa ennen kuin kehittyneitä säätö- ja käyttötarkkailumenetelmiä voidaan suunnitella riittävän luotettavasti:

- ohjauksen kehittämistä ajatellen riittävän kattavan käyttö-tarkkailu- ja ohjausjärjestelmien laitteistokysymykset
- laitteistojen sijoitustarve, johon liittyy myös pelkistämistekniikka
- ohjaustapojen yleiset vaatimukset ja yleinen soveltuvuus
- säätöön soveltuvien ohjelmistojen kehittäminen
- säätöön soveltuva kulutusennustemetodiikka
- järjestelmän tilan arviointi käyttötilanteen perusteella.

KIRJALLISUUSLUETTELO

1. Abraha, B., Analysis and optimization of water supply distribution networks using digital computers. Post Graduate Course in Water Supply and Water Resources Engineering. HTKK 1973.
2. Bree, D.W. & Benzvi, R., Program documentation for watsim a program for extended period simulation of water distribution network. Systems Control Inc., September, 1974.
3. Epp, R. & Fowler, A.G., Efficient code for steady-state flows in networks. Journal of the Hydraulics Division. ASCE, HY 1/1970.
4. Kunnallistieto Oy, Vesijohtoverkon mitoitus. KUNTA 500.
5. Laukkanen, R., Probleemaorientoitunut vedenjakelujärjestelmän suunnittelu. Diplomityö 1975.
6. Malinen, A., Virtaamien tasoitushjelma, Colebrookin kaava. HKV 101, HKV-moniste 3.1.1969.
7. Malinen, A., Virtaamien tasoitushjelma, vuorokausiohjelma. HKV 102, HKV-moniste 20.1.1969.
8. McPherson, M.B., System operation, control and monitoring. Part I; Fundamentals.
9. Rao, H.S., Bree Jr., D.W. & Benzvi, R., Extended period simulation of water distribution networks. Systems Control INC., February, 1974.
10. Rao, H.S., Bree Jr., D.W. & Kendall, B.N., Studies of operation planning and control of water distribution systems. Systems Control, INC., 1975.
11. Rao, H.S. & Seitle, R.A., Computer applications in urban water distribution system control. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, June, 1975.
12. Shamir, U. & Howard, D.C.D., Water distribution systems analysis. Journal of the Hydraulics Division. ASCE, HY 1/1968.
13. Shamir, U., & Howard, D.C.D., Closure. Journal of the Hydraulics Division. ASCE, HY 2/1970.
14. Shamir, U., Water distribution system analysis. IBM research document RL 4389, June, 1973.
15. Teknillinen Laskenta Oy, Vesijohtoverkon mitoitus. TE 5600.

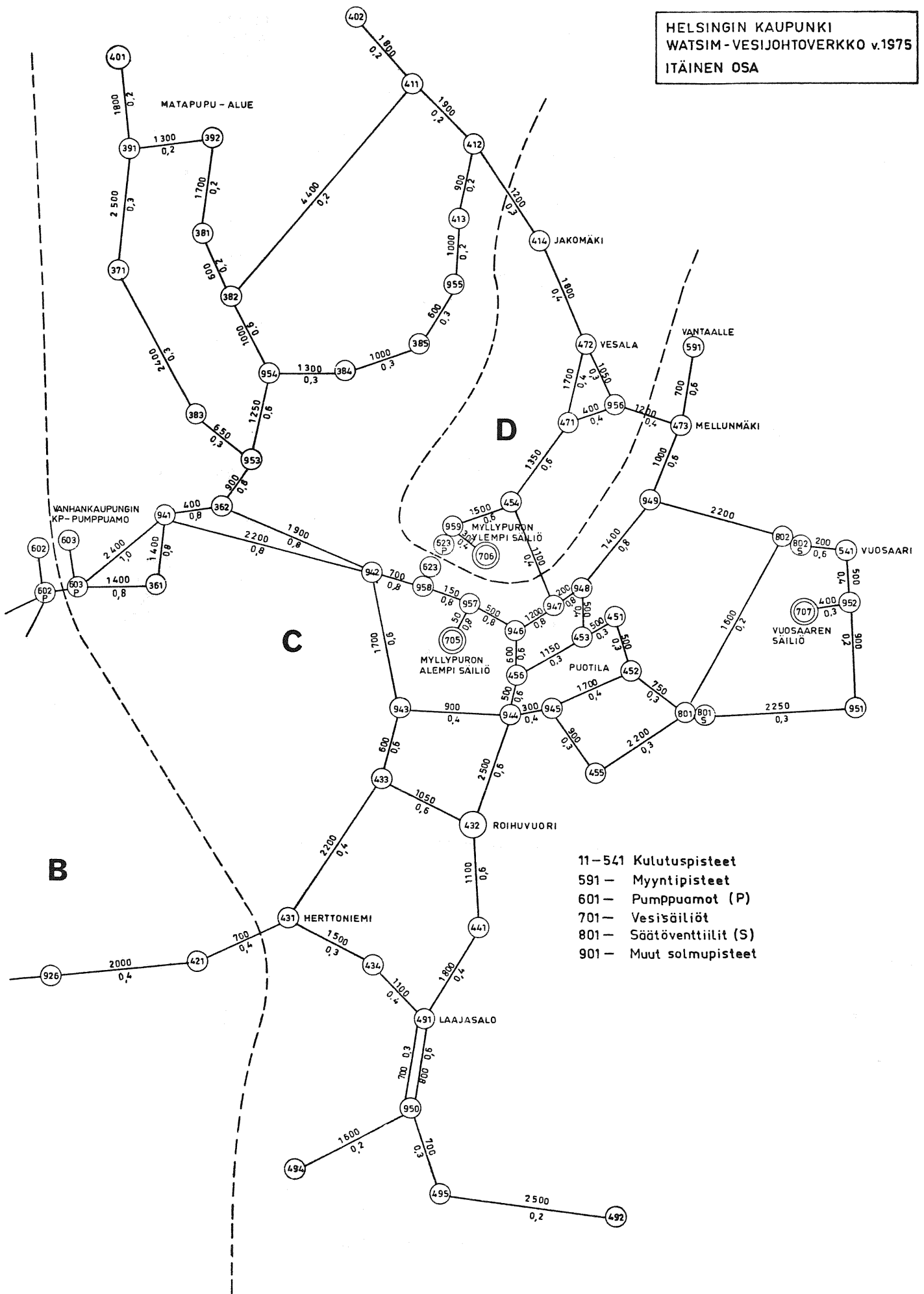
16. Teknillinen Laskenta Oy, Vesijohtoverkon vuorokausilaskenta. TE 5615.
17. UNIVAC 1108 ohjelmaselosteet.
18. Yletyinen, P., Vesijohtoverkon optimaalinen mitoitus ja investointien ajoitus. HTKK, tieteellisiä julkaisuja 48.
19. Donachie, P.R., Digital Program for Water Network Analysis Journal of the Hydraulics Division HY 3, March, 1974.
20. PP 9600 Kaukokäyttöjärjestelmä. Nokia Oy, esite.
21. Liimatainen, Y. & Saarikoski, K., Vesijohtoverkon toiminnan luotettavuus. YVY-tutkimus n:o 3.
22. Damelin, E., Shamir, U. & Akad, N., Engineering and economic evaluation of the reliability of water supply-water resources research. Vol. 8 n:o 4, Aug., 1972, ss. 961...877.

LIITELUETTELO

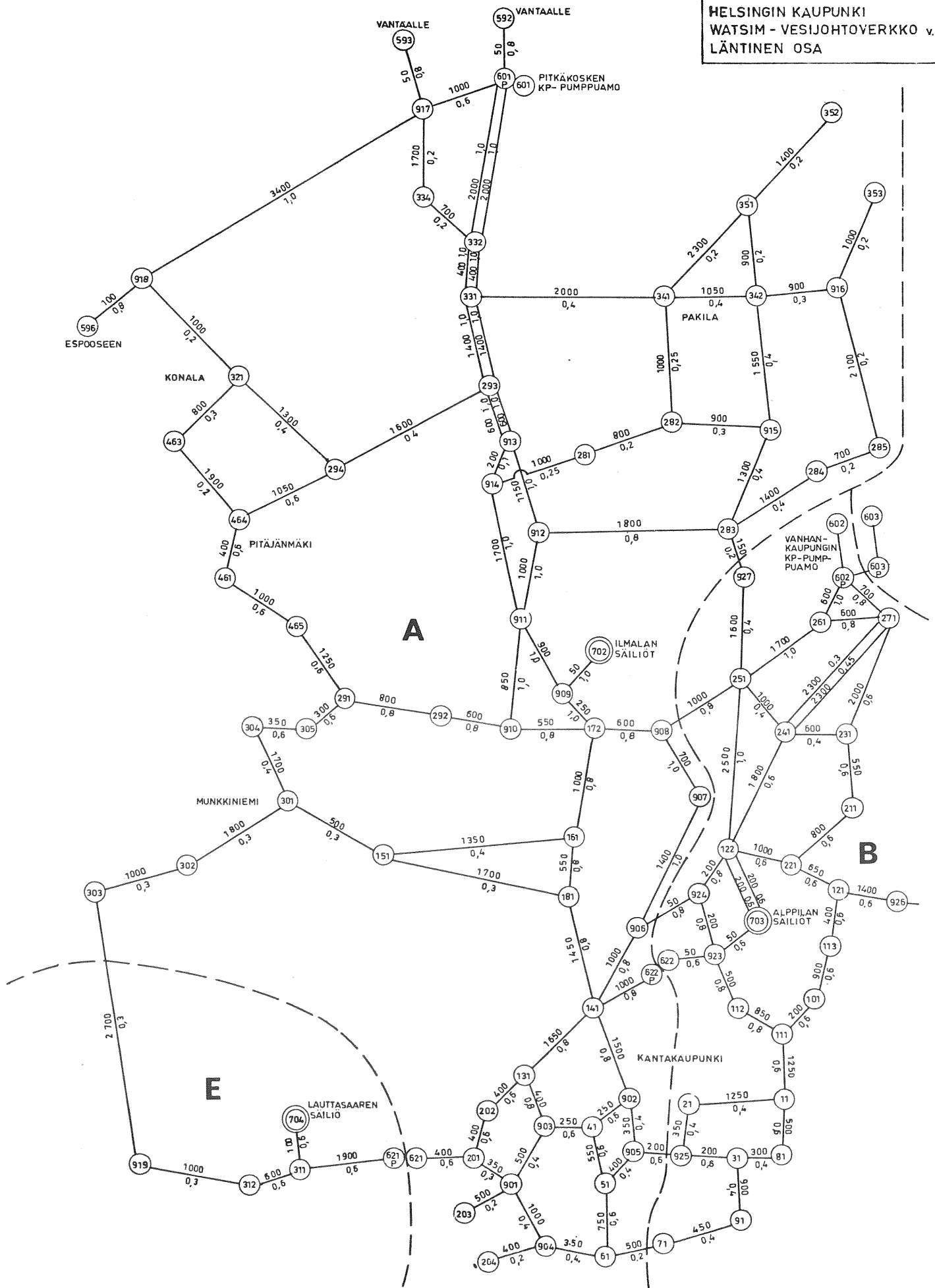
1. Helsingin kaupunki, WATSIM-vesijohtoverkko (kartta)
la Itäinen osa
lb Läntinen osa
2. Ilmalan säiliöiden tilavuuskäyrät
3. Alppilan säiliön tilavuuskäyrä
4. Lauttasaaren säiliön tilavuuskäyrä
5. Myllypuron alemman säiliön tilavuuskäyrä
6. Myllypuron ylemmän säiliön tilavuuskäyrä
7. Vuosaaren säiliön tilavuuskäyrä
8. Solmupisteiden kulutusmäärät kulutustyypeittäin
9. Alkuperäiset kulutuskuviot
10. Kulutukset Helsingin itäisillä ja koillisilla alueilla
11. Kalibroidut kulutuskuviot
12. Mallin kalibrointi: Ilmalan säiliön vesipinta
13. Mallin kalibrointi: Alppilan säiliön vesipinta
14. Mallin kalibrointi: Lauttasaaren säiliön vesipinta
15. Mallin kalibrointi: Myllypuron alemman säiliön vesipinta
16. Mallin kalibrointi: Myllypuron ylemmän säiliön vesipinta
17. Mallin kalibrointi: Vuosaaren säiliön vesipinta
18. Mallin kalibrointi: Painekorkeus solmussa 621 A (Porkkalan-
katu)
19. Mallin kalibrointi: Painekorkeus solmussa 31 B (Unioninkatu)
20. Mallin kalibrointi: Painekorkeus solmussa 491 C (Laajasalo,
Kuvernöörintie)
21. Mallin kalibrointi: Painekorkeus solmussa 472 D (Vesala,
Rapolantie)
22. Putkirikon ja siitä aiheutuvien toimenpiteiden tutkiminen
(kartta)
23. Putkirikko: Tilanne säiliössä 705 C (Myllypuron alempi)
24. Putkirikko: Tilanne säiliössä 707 C (Vuosaari)
25. Putkirikko: Tilanne säiliössä 706 D (Myllypuron ylempi)
26. Putkirikko: Tilanne solmussa 452 C (Puotila)
27. Putkirikko: Tilanne solmussa 473 C (Mellunmäki)
28. Putkirikko: Tilanne solmussa 541 C (Vuosaari)
29. Putkirikko: Tilanne solmussa 432 C (Roihuvuori)

30. Putkirikko: Tilanne solmussa 491 C (Laajasalo)
31. Putkirikko: Tilanne solmussa 472 D (Vesala)
32. Itäisen alueen vedenjakelun tutkiminen (kartta)
33. 1980-tilanne säiliöissä 705 (Myllypuron alempi) ja 708 (Roihuvuori) ilman kuristussäätöä
34. 1985-tilanne säiliöissä ilman kuristussäätöä
35. 1980-tilanne säiliöissä, säätö 957-705 $\varnothing = 0,6$ m, L = 1500 m, klo 7 - 7
36. 1985-tilanne säiliöissä, säätö 957-705 $\varnothing = 0,6$ m, L = 1500 m, klo 7 - 7
37. 1980-tilanne säiliöissä, säätö 957-705 $\varnothing = 0,6$ m, L = 1500 m, klo 21 - 7
38. 1985-tilanne säiliöissä, säätö 957-705 $\varnothing = 0,6$ m, L = 1500 m, klo 21 - 7
39. 1990-tilanne säiliöissä, säätö 957-705 $\varnothing = 0,6$ m, L = 1500 m, klo 20 - 7
40. 1990-tilanne säiliöissä, säätö 958-957 $\varnothing = 0,6$ m, L = 2000 m, klo 7 - 7
41. 1990-tilanne säiliöissä, säätö 958-957 $\varnothing = 0,6$ m, L = 1000 m, klo 7 - 7
42. Vuosaaren säiliö (707) 1990-tilanteessa, säätö 958-957 $\varnothing = 0,6$ m, L = 1000 m, klo 7 - 7
43. Kulutuskuvioiden kalibroinnin laskennalliset kaavat

HELSINGIN KAUPUNKI
WATSIM - VESIJOHTOVERKKO v.1975
ITÄINEN OSA



HELSINGIN KAUPUNKI
WATSIM - VESIJOHTOVERKKO v.1975
LÄNTINEN OSA



ILMALAN VESISÄILIÖIDEN TILAVUUSKAYRAT

ILMALA I YLIN VESIPINTA + 68,50 m POHJA + 61,00 m

ILMALA II - - - + 68,50 m - - - + 61,00 m

VESITILAVUUS ILMALA I 20 000 m³

- - - ILMALA II 21 500 m³

VESITILAVUUS

m³

25 000

20 000

15 000

10 000

5 000

0

+ 60,0 m

+ 61,0

+ 62,0

+ 63,0

+ 64,0

+ 65,0

+ 66,0

+ 67,0

+ 68,0

+ 69,0 m

VEDENKORKEUS + m

21 500 m³ ILMALA II

20 000 m³ ILMALA I

+ 68,50 m

HKV 11.6.1975

ALPPILAN VESISÄILIÖN TILAVUUSKÄYRÄ

YLIN VESIPINTA + 56,3 m

POHJA (nelikulm säiliö) + 50,7 m (pyöreä säiliö) + 50,7 m

VESITILAVUUS 28 000 m³

VESITILAVUUS

m³

30 000

25 000

20 000

15 000

10 000

5 000

0

+50,0 m

+51,0 m

+52,0 m

+53,0 m

+54,0 m

+55,0 m

+56,0 m

+57,0 m

VEDENKORKEUS + m

28 000 m³
+56,3 m

LAUTTASAAREN VESISÄILIÖN
TILAVUUSKÄYRÄ

YLIN VESIPINTA +57,0 m POHJA +50,0 m
VESITILAVUUS 4 250 m³

VESITILAVUUS

m³

4 500

4 000

3 500

3 000

2 500

2 000

1 500

1 000

500

0

+50,0 m

+51,0

+52,0

+53,0

+54,0

+55,0

+56,0

+57,0 m

VEDENKORKEUS + m

4 250 m³

+57,0 m

HKV LITE 4

HKV 11.5.1975

VUOSAAREN VESISÄILÖN
TILAVUUSKAYRÄ

YLIN VESIPINTA +64,0 m

POHJA +56,0 m

VESITILAVUUS 1500 m³

VESITILAVUUS

m³

2 000

1 500

1 000

500

0

+56,0 m

+57,0 m

+58,0 m

+59,0 m

+60,0 m

+61,0 m

+62,0 m

+63,0 m

+64,0 m

VEDENKÖRKEYS + m

HKV/R/RV 25.1.1974

HKV LIITE 7

V E S I J O H T O V E R K O S T O N S I M U L O I N T I

KULUTUSALLOKOINTIKORTIT

TYYPPI KÄYRÄ		SOLMU-ID		PAINEP		KULUTUS		SOLMU-ID		PAINEP		KULUTUS		SOLMU-ID		PAINEP		KULUTUS	
NRO	LA	1	907	L/S	A	282	A	34.50	283	A	.36	284	A	17.88	L/S	A	32.87	A	32.87
LA 1	1	285	.41	A	291	43.40	A	2.98	292	A	.21	303	A	3.46					
LA 1	1	294	2.25	A	301	33.06	A	4.90	302	A	10.92	331	A	19.80					
LA 1	1	304	19.58	A	305	4.90	A	1.38	321	A	.56	351	A	.14					
LA 1	1	332	.02	A	341	.02	A	7.97	342	A	.00	464	A	.06					
LA 1	1	352	.19	A	461	.00	A	2.52	463	A	.00		A	.00					
LA 1	1	465	4.37	A	241	9.19	B	3.08	251	B	.00	261	B	10.32					
LA 1	1	231	.62	B	421	.12	C	1.62	381	C	1.72	382	C	3.74					
LA 1	1	271	29.35	C	371	.02	C	5.07	392	C	.36	401	C	7.93					
LA 1	1	383	.91	C	411	10.42	C	24.16	452	C	.00	453	C	26.90					
LA 1	1	441	19.31	C	491	20.20	D	40.40	492	D	.00	541	C	12.78					
LA 1	1	473	61.58	E	511	70.40	E	38.55	471	D	.00	472	D	38.08					
LA 1	1	414	3.56	A	151	32.20	A	21.24	61	A	19.58	131	A	61.78					
LA 2	2	41	32.20	B	21	9.35	B	2.79	161	A	8.49	181	A	8.62					
LA 2	2	141	42.42	B	91	9.21	B	2.00	31	B	5.39	71	B	31.61					
LA 2	2	204	.04	A	131	.04	A	.65	141	A	.08	161	A	.14					
LA 2	2	11	.24	A	281	2.15	A	1.14	291	A	1.34	292	A	.87					
LA 2	2	81	2.15	B	285	.18	A	.23	301	A	1.77	302	A	1.05					
LA 2	2	112	1.05	A	294	.77	A	.51	321	A	1.11	331	A	.53					
LA 2	2	211	1.59	A	304	.44	A	.46	341	A	7.65	342	A	4.21					
LA 3	3	41	.08	B	334	.08	B	.25	353	A	.00	463	A	.91					
LA 3	3	907	2.53	B	465	.11	B	.11	122	B	.14	221	B	.07					
LA 3	3	284	.09	C	112	.09	C	.00	251	B	1.32	261	B	.52					
LA 3	3	293	.63	C	241	.09	C	.41	381	C	.41	382	C	.53					
LA 3	3	303	.03	C	385	.03	C	.05	391	C	2.61	392	C	.49					
LA 3	3	413	.03	C	402	.03	C	1.67	411	C	.58	412	C	.06					
LA 3	3	452	1.65	C	431	.11	C	1.30	441	C	3.01	451	C	.91					
LA 3	3	491	.78	D	453	.29	C	.68	455	C	.20	473	C	.33					
LA 3	3	454	1.07	E	492	.47	D	.47	495	C	.10	541	C	3.34					
LA 3	3	311	.11	E	471	2.13	E	.09	472	D	.00			.00					
LA 4	4	61	1.12	A	312	.11	A	.19	161	A	.07	907	A	.15					
LA 4	4	281	.68	A	282	.51	A	.17	283	A	.54	284	A	1.02					
LA 4	4	285	1.52	A	291	1.84	A	.00	321	A	.67	331	A	.37					
LA 4	4	302	.43	A	303	.09	B	.25	341	A	3.48	342	A	1.63					
LA 4	4	332	.43	A	352	.43	A	.00	353	A	.05	463	A	1.21					
LA 4	4	351	.09	B	231	.43	B	.40	241	B	.21	251	B	.86					
LA 4	4	464	1.10	C	421	.08	C	3.28	382	C	.61	383	C	.04					
LA 4	4	221	.06	C	391	.53	C	1.02	392	C	.30	401	C	.02					
LA 4	4	434	1.53	C	411	.24	C	.69	451	C	4.62	453	C	.23					
LA 4	4	455	.24	C	473	.24	C	.15	491	C	.97	492	C	.58					
LA 4	4	495		C	541		C	.44			.00			.00					

HKV LIITE 9
ALKUPERÄISET
KULUTUSKUVIOT

----- V E S I J O H T O V E R K O S T O N S I M U L O I N T I -----
KULUTUSKUVIOKORTIT

KOODI KÄYRÄ KORTTI NRO ARO		SUHTEELLINEN KULUTUS									
LC	1	026	040	092	105	109	079	106	158	105	079
LC	2	023	037	092	102	109	138	101	147	138	087
LC	3	038	000	207	102	076	000	076	152	207	205
LC	4	000	000	103	103	000	000	103	109	103	000
LC	5	074	058	068	105	111	132	121	121	095	106
LC	6	030	060	053	121	143	189	158	121	083	053
LC	7	033	056	111	200	222	222	122	056	044	033
LC	8	076	076	087	098	120	153	120	109	098	076
LC	9	058	068	092	154	157	154	140	075	068	065
LC	10	045	047	097	134	179	184	161	087	087	052
LC	21	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
LC	31	066	048	119	115	107	119	115	119	107	083

VESIJOHTOVERKOSTON SIMULONTI

KULUTUSKUVIOTOKORTIT

KODDI KAYRA KORTTI NRO NRO		SUHTEELLINEN KULUTUS			
LC	4	0.00	0.00	1.63	1.63
LC	3	0.00	0.00	2.27	2.27
LC	31	0.85	0.76	1.52	1.52
LC	1	0.26	1.19	1.15	1.19
LC	7	0.33	0.92	1.06	1.58
LC	5	0.79	1.11	0.67	0.56
LC	41	1.00	1.22	1.21	1.21
LC	8	0.66	1.16	1.21	0.89
LC	9	0.63	0.87	1.20	1.09
LC	10	0.42	0.92	0.85	0.75
LC	21	1.00	0.97	1.84	0.87
LC	11	0.68	1.00	1.00	1.00
			0.92	1.54	0.75
			1.57	1.40	0.68
					0.00
					2.05
					0.83
					0.79
					0.33
					1.16
					0.96
					0.76
					0.65
					0.52
					1.00
					0.65

V E S I J O H T O V E R K O S T O N S I M U L O I N T I

KULUTUSALLOKOINTIKORTIT 1980

TYYPPI	KAYRA	SOLMU-ID	PAINEP	KULUTUS	SOLMU-ID	PAINEP	KULUTUS	SOLMU-ID	PAINEP	KULUTUS	SOLMU-ID	PAINEP	KULUTUS
NRO				L/S			L/S			L/S			L/S
LA 1	361	C		99	371	C	24.74	381	C	16.83	382	C	13.52
LA 1	383	C		55.87	391	C	4.50	392	C	10.95	401	C	16.68
LA 1	402	C		1.26	411	C	20	414	D	31.16	431	C	45.05
LA 1	432	C		35.58	441	C	2.17	451	C	12.06	452	C	25.49
LA 1	453	C		20.38	454	D	38.02	455	C	07	471	D	73.91
LA 1	472	D		15.99	473	C	28.92	491	C	53.35	492	C	26
LA 1	541	C		78.38			00			00			00
LA 4	402	C		9.45	411	C	5.10	412	C	1.38	414	D	30
LA 3	383	C		67	385	C	10	391	C	7.22	392	C	3.08
LA 3	402	C		8.13	411	C	3.65	412	C	75	413	C	35
LA 3	361	C		70	371	C	3.34	381	C	1.46	382	C	1.92
LA 3	431	C		1.73	441	C	7.24	451	C	2.15	452	C	15
LA 3	453	C		1.08	454	D	1.03	455	C	6.39	471	D	65
LA 3	472	D		36	491	C	3.64	492	C	1.71	495	C	89
LA 3	541	C		7.92			00			00			00
LA 4	361	C		07	371	C	8.78	381	C	47	382	C	1.92
LA 4	383	C		07	385	C	15	391	C	8.22	392	C	1.91
LA 4	431	C		1.03	441	C	1.65	451	C	4.75	453	C	36
LA 4	454	D		1.13	455	C	11.27	471	D	88	472	D	1.02
LA 4	473	C		43	491	C	2.15	492	C	3.36	495	C	1.07
LA 4	541	C		90			00			00			00
LA 5	371	C		40	381	C	1.59	382	C	2.74	383	C	1.12
LA 5	391	C		88	392	C	1.13	401	C	80	402	C	17
LA 5	411	C		29	413	C	55	414	D	29	431	C	55
LA 5	432	C		12	433	C	49	434	C	71	451	C	60
LA 5	452	C		56	453	C	3.09	454	D	4.69	455	C	15
LA 5	456	C		41	471	D	7.37	472	D	10	473	C	09
LA 5	491	C		92	494	C	2.51	541	C	2.49			00
LA 11	371	C		19	381	C	1.21	382	C	2.31	383	C	1.22
LA 11	391	C		28	392	C	95	411	C	38	414	D	3.24
LA 11	431	C		2.49	432	C	1.92	451	C	30	452	C	1.53
LA 11	453	C		96	454	D	1.36	471	D	3.78	473	C	33
LA 11	491	C		4.83	541	C	2.04			00			00
LA 7	371	C		60	382	C	10	401	C	2.67	414	D	10
LA 7	431	C		3.16	432	C	2.82	441	C	12	452	C	1.96
LA 7	453	C		36	454	D	2.16	472	D	37	473	C	40
LA 8	381	C		42	382	C	1.17	383	C	46	412	C	44
LA 8	433	C		1.23	451	C	13	453	C	1.18	541	C	3.24
LA 9	362	C		10.91	381	C	2.78	383	C	20	391	C	2.23
LA 9	392	C		92	401	C	2.50	402	C	2.50	411	C	1.26
LA 9	431	C		4.58	432	C	2.84	433	C	8.11	434	C	29
LA 9	451	C		3.21	453	C	28	454	D	43	455	C	1.29
LA 9	456	C		15.45	471	D	41	491	C	2.07	541	C	63
LA 10	361	C		5.03	371	C	61	381	C	12.42	382	C	4.18
LA 10	384	C		1.01	391	C	12	392	C	7.96	402	C	1.81
LA 10	413	C		1.34	433	C	58.24	434	C	38.06	451	C	15
LA 10	456	C		3.70	471	D	1.36	494	C	5.57	541	C	68.68
LA 21	603P	C		11.57			00			00			00
LA 31	591	C		01			00			00			00

V F S I J O H T U V E R K O S T O N S I M U L O I N T I I

KULUTUSALLOKOINTIKORTIT

1985

TYYPPI	KAYRA	SOLMU-ID	PAINEP	KULUTUS	SOLMU-ID	PAINEP	KULUTUS	SOLMU-ID	PAINEP	KULUTUS	L/S	KULUTUS	PAINEP	SOLMU-ID	PAINEP	KULUTUS	L/S	KULUTUS
	NRO			L/S			L/S			L/S		L/S				L/S		L/S
LA	1	361	C	1.12	371	C	28.09	381	C	22.27	382	C	C	382	C	17.89		
LA	1	393	C	73.92	391	C	5.30	392	C	12.90	401	C	C	401	C	21.45		
LA	1	402	C	1.62	411	C	.23	414	D	35.67	431	C	C	431	C	53.45		
LA	1	432	C	42.22	441	C	2.45	451	C	15.40	452	C	C	452	C	32.54		
LA	1	453	C	26.02	454	D	48.54	455	C	.09	471	D	C	471	D	89.62		
LA	1	472	D	19.39	473	C	35.06	491	C	66.98	492	C	C	492	C	.33		
LA	1	541	C	88.57			.00			.00						.00		
LA	3	361	C	.79	371	C	3.80	381	C	1.93	382	C	C	382	C	2.54		
LA	3	383	C	.38	385	C	.14	391	C	8.51	392	C	C	392	C	3.63		
LA	3	402	C	10.45	411	C	4.18	412	C	.86	413	C	C	413	C	.40		
LA	3	431	C	2.06	441	C	8.18	451	C	2.75	452	C	C	452	C	.19		
LA	3	453	C	1.38	454	D	1.31	455	C	8.16	471	D	C	471	D	.79		
LA	3	472	D	.44	491	C	4.57	492	C	2.15	495	C	C	495	C	1.12		
LA	3	541	C	8.95			.00			.00						.00		
LA	4	361	C	.68	371	C	9.97	381	C	.62	382	C	C	382	C	2.54		
LA	4	402	C	12.15	411	C	5.64	412	C	1.58	414	D	C	414	D	.34		
LA	4	383	C	.09	385	C	.20	391	C	9.68	392	C	C	392	C	2.25		
LA	4	431	C	1.22	441	C	1.86	451	C	6.07	453	C	C	453	C	.46		
LA	4	454	D	1.45	455	C	14.40	471	D	1.06	472	D	C	472	D	1.23		
LA	4	473	C	.52	491	C	2.70	492	C	4.21	495	C	C	495	C	1.34		
LA	4	541	C	1.02			.00			.00						.00		
LA	5	371	C	.57	381	C	2.01	382	C	3.47	383	C	C	383	C	1.42		
LA	5	391	C	1.12	392	C	1.44	401	C	1.21	402	C	C	402	C	.26		
LA	5	411	C	.41	413	C	.76	414	D	.41	431	C	C	431	C	.62		
LA	5	432	C	.14	433	C	.55	434	C	.80	451	C	C	451	C	.80		
LA	5	452	C	.75	453	C	4.10	454	D	6.24	455	C	C	455	C	.20		
LA	5	456	C	.54	471	D	9.51	472	D	.12	473	C	C	473	C	.11		
LA	5	491	C	1.39	494	C	3.80	541	C	2.81						.00		
LA	11	371	C	.27	381	C	2.00	382	C	3.81	383	C	C	383	C	2.01		
LA	11	391	C	.47	392	C	1.62	411	C	.55	414	D	C	414	D	4.70		
LA	11	431	C	2.81	432	C	2.17	451	C	.67	452	C	C	452	C	3.42		
LA	11	453	C	2.15	454	D	3.04	471	D	4.44	473	C	C	473	C	.38		
LA	11	491	C	5.75	541	C	2.53			.00						.00		
LA	7	371	C	.87	382	C	.17	401	C	5.50	414	D	C	414	D	.15		
LA	7	431	C	3.57	432	C	3.19	441	C	.20	452	C	C	452	C	4.38		
LA	7	453	C	.80	454	D	4.70	472	D	.44	473	C	C	473	C	.47		
LA	8	381	C	.76	382	C	2.10	383	C	.82	412	C	C	412	C	.66		
LA	8	433	C	1.47	451	C	.26	453	C	2.31	541	C	C	541	C	3.66		
LA	9	362	C	17.19	381	C	4.99	383	C	.36	391	C	C	391	C	2.54		
LA	9	392	C	1.05	401	C	3.58	432	C	3.58	411	C	C	411	C	1.89		
LA	9	431	C	5.48	432	C	3.40	433	C	9.71	434	C	C	434	C	.35		
LA	9	451	C	6.28	453	C	.54	454	D	.84	455	C	C	455	C	2.52		
LA	9	456	C	30.24	471	D	.96	491	C	2.44	541	C	C	541	C	.71		
LA	10	361	C	6.20	371	C	.69	381	C	15.39	382	C	C	382	C	5.19		
LA	10	384	C	1.25	391	C	.13	392	C	8.99	402	C	C	402	C	2.80		
LA	10	413	C	1.92	433	C	68.24	434	C	44.60	451	C	C	451	C	.18		
LA	10	456	C	4.40	471	D	1.54	494	C	8.45	541	C	C	541	C	77.61		
LA	21	603P	C	11.57			.00			.00						.00		
LA	31	591	C	.01			.00			.00						.00		

V E S I J O M T O V E R K O S T O N S I M U L O I N T I

KULUTUSKUVIOKORTIT

KOODI KAYRA KORTTI
NRU NRO

SUITEELLINEN KULUTUS

LC	1	0	.28	.31	.44	.86	1.35	1.15	1.11	1.19	1.10	1.47	1.65	1.09
LC	2	0	.40	.26	.42	.86	1.10	1.09	1.60	1.21	1.33	1.37	1.25	1.10
LC	3	0	.00	.49	.00	2.31	1.05	.78	.29	.78	.41	1.43	2.01	1.44
LC	4	0	.00	.00	.00	1.73	1.15	.27	.10	1.60	4.43	1.01	1.44	.27
LC	5	0	.65	.87	.52	.58	.76	.95	1.50	1.39	1.26	1.13	.87	1.32
LC	6	0	.48	.34	.70	.38	.89	1.21	2.09	1.84	1.50	1.13	.77	.67
LC	7	0	.35	.39	.63	1.01	1.46	1.89	2.64	1.57	.73	.52	.40	.40
LC	8	0	.71	.91	.75	.72	.71	1.00	1.70	1.41	1.25	1.02	.89	.92
LC	9	0	.74	.69	.72	.80	1.14	1.38	1.87	1.65	.92	.71	.64	.77
LC	10	0	.45	.54	.47	.90	.97	1.48	2.14	1.87	.93	.81	.78	.66
LC	11	0	1.07	1.19	.99	.80	.72	.87	1.19	1.14	1.04	.93	.96	1.17
LC	12	0	.91	.77	.42	1.15	.82	.94	1.39	1.32	1.20	1.11	.97	1.01
LC	11	0	.37	.47	.56	.98	2.51	.00	.90	.99	1.01	1.52	1.72	.97
LC	12	0	.53	.22	1.69	.00	1.87	.57	1.29	.88	1.25	1.41	1.29	1.01
LC	13	0	.00	1.24	.00	3.27	.00	.90	.00	.35	.36	1.48	2.12	2.29
LC	14	0	.00	.00	.00	3.74	.00	.00	.00	1.25	4.33	1.01	1.51	.16
LC	15	0	1.13	1.28	.00	.86	1.09	1.14	.89	1.15	1.15	1.16	.90	1.25
LC	16	0	.65	.33	2.88	.00	.00	1.31	1.46	1.46	1.35	1.16	.79	.61
LC	17	0	.47	.60	1.12	.30	3.54	1.01	2.03	.99	.61	.54	.42	.37
LC	18	0	.95	1.53	.00	1.31	.47	1.92	.69	1.18	1.14	1.04	.92	.86
LC	19	0	.99	.93	.37	1.40	1.50	1.71	.85	1.38	.78	.73	.65	.73
LC	20	0	.60	.86	.00	1.93	.49	3.05	.40	1.66	.77	.83	.81	.61
LC	21	0	1.44	1.82	.00	1.69	.09	1.88	.09	1.06	.94	.96	.93	1.10
LC	22	0	1.22	.94	.00	2.35	.00	1.78	.37	1.17	1.09	1.14	1.01	.94
LC	23	0	.14	.05	.04	1.23	1.03	1.86	.91	1.09	1.39	1.78	2.00	.42
LC	24	0	.20	.05	.04	1.22	.87	1.72	1.30	1.18	1.64	1.67	1.50	.60
LC	25	0	.00	.05	.02	2.00	.99	1.49	.29	.67	.59	1.70	2.60	1.60
LC	26	0	.00	.00	.00	1.26	.93	.84	.17	1.28	4.66	1.36	1.84	.20
LC	27	0	.43	.15	.09	1.63	.71	1.51	1.21	1.30	1.60	1.38	1.00	.98
LC	28	0	.25	.07	.06	1.16	.72	1.77	1.66	1.72	1.96	1.40	.86	.38
LC	29	0	.18	.06	.06	1.56	1.14	2.77	2.09	1.59	1.17	.66	.46	.25
LC	30	0	.36	.14	.10	1.88	.72	1.59	1.38	1.35	1.61	1.25	1.00	.57
LC	31	0	.38	.12	.09	1.78	.97	2.12	1.50	1.55	1.35	.88	.74	.53
LC	32	0	.23	.09	.06	1.48	.83	2.14	1.70	1.55	1.42	1.00	.95	.35
LC	33	0	.55	.19	.14	2.40	.80	1.50	.99	1.07	1.32	1.14	1.09	.80
LC	34	0	.14	.14	.08	1.92	.80	1.56	1.14	1.23	1.52	1.36	1.16	.62

V E S I J O H T O V E R K O S T O N S I M U L O I N T I

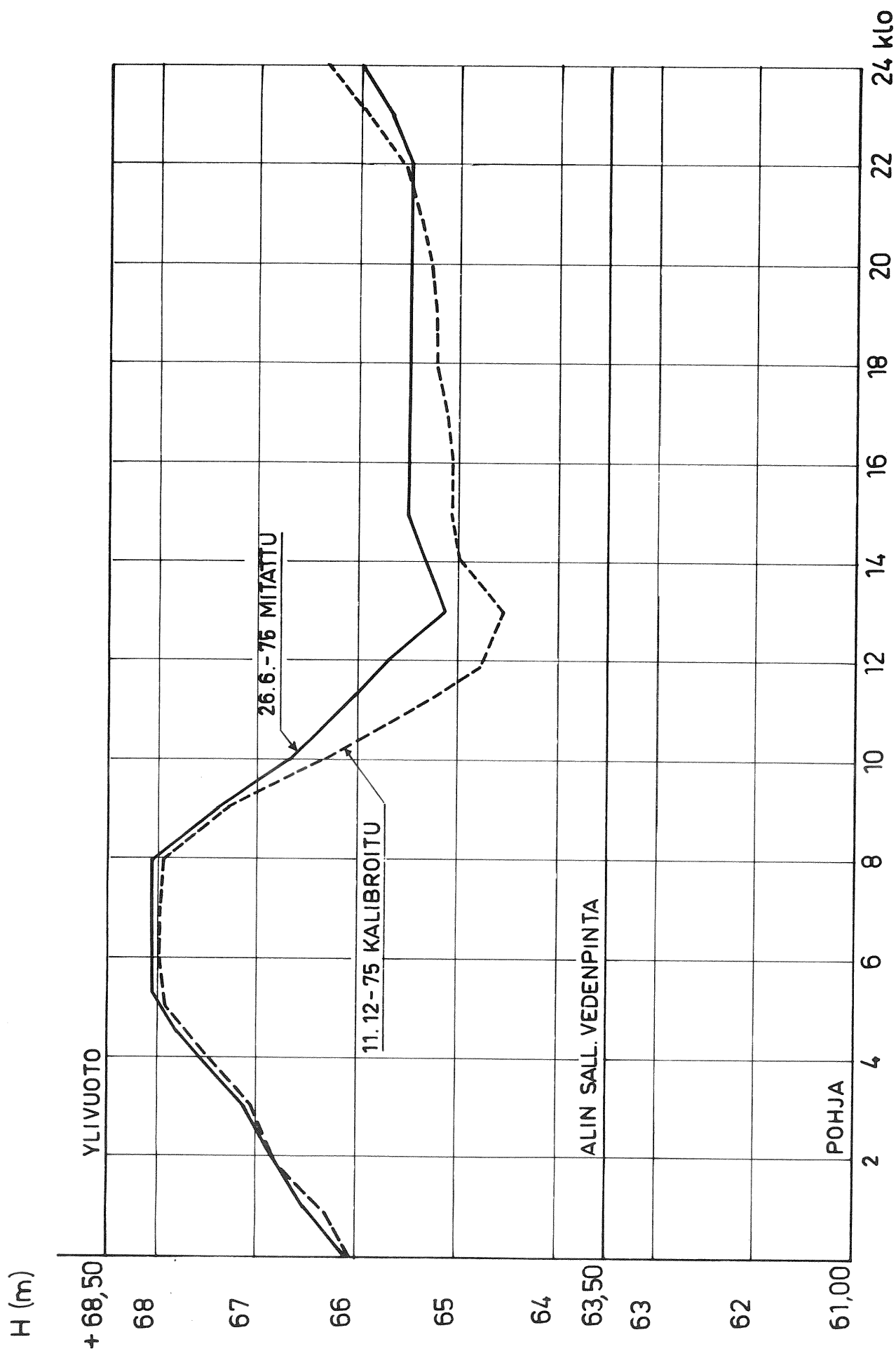
KULUTUSALLOKINTIKORTIT

TYYPPI KAYRA SOLMU-ID PAINEP KULUTUS SOLMU-ID PAINEP KULUTUS SOLMU-ID PAINEP KULUTUS SOLMU-ID PAINEP KULUTUS									
NKO	L/S	L/S	L/S	L/S	L/S	L/S	L/S	L/S	L/S
LA 31	907	A	41	282	A	3450	283	A	36
LA 31	285	A	257	291	A	4340	292	A	298
LA 31	294	A	225	301	A	3306	302	A	21
LA 31	304	A	1958	305	A	4090	321	A	1092
LA 31	332	A	02	341	A	1308	342	A	56
LA 31	352	A	02	461	A	797	463	A	520
LA 31	465	A	19		A	00		A	00
LA 16	231	B	437	241	B	252	251	B	654
LA 16	271	B	62	421	B	919		B	00
LA 1	361	C	12	371	C	300	381	C	467
LA 1	363	C	2935	391	C	162	392	C	172
LA 1	402	C	02	411	C	03	431	C	3390
LA 1	441	C	91	451	C	507	452	C	1670
LA 1	473	C	1042	491	C	2416	492	C	36
LA 1	414	D	1931	454	D	2877	471	D	5372
LA 31	311	E	2020	312	E	4040		E	00
LA 32	41	A	6158	51	A	3855	61	A	1958
LA 32	141	A	11305	151	A	2124	161	A	849
LA 32	204	A	356		A	00		A	00
LA 17	11	B	3220	21	B	279	31	B	539
LA 17	81	B	935	91	B	200	101	B	1372
LA 17	112	B	1452	113	B	600	121	B	792
LA 17	211	B	921	221	B	2534		B	00
LA 33	41	A	04	131	A	65	141	A	500
LA 33	907	A	24	281	A	02	282	A	91
LA 33	284	A	215	285	A	114	291	A	134
LA 33	293	A	18	294	A	23	301	A	177
LA 33	303	A	105	304	A	51	321	A	111
LA 33	332	A	77	334	A	46	341	A	765
LA 33	351	A	159	352	A	49	353	A	04
LA 33	464	A	44	465	A	11		A	00
LA 18	91	B	08	112	B	25	122	B	14
LA 18	231	B	69	241	B	121	251	B	132
LA 18	421	B	45		B	00		B	00
LA 3	361	C	09	371	C	41	381	C	41
LA 3	383	C	63	385	C	05	391	C	261
LA 3	401	C	03	402	C	167	411	C	58
LA 3	413	C	03	431	C	1300	441	C	301
LA 3	452	C	11	453	C	68	455	C	07
LA 3	491	C	165	492	C	29	495	C	20
LA 3	454	D	78	471	D	47	472	D	10
LA 33	311	E	107	312	E	213		E	00
LA 34	61	A	11	141	A	350	161	A	07
LA 34	281	A	112	282	A	19	283	A	54
LA 34	285	A	68	291	A	17	294	A	23
LA 34	302	A	51	303	A	301	321	A	67
LA 34	332	A	152	334	A	105	341	A	348
LA 34	351	A	184	352	A	57	353	A	05
LA 34	464	A	43		A	00		A	00
LA 19	221	B	09	231	B	25	241	B	21
LA 19	261	B	43	421	B	41		B	00
LA 4	371	C	110	381	C	13	382	C	01
LA 4	385	C	08	391	C	328	392	C	30
LA 4	402	C	16	411	C	102	412	C	23
LA 4	434	C	06	441	C	69	451	C	462
LA 4	465	C	153	473	C	15	491	C	97
LA 4	495	C	24	541	C	44	492	C	00

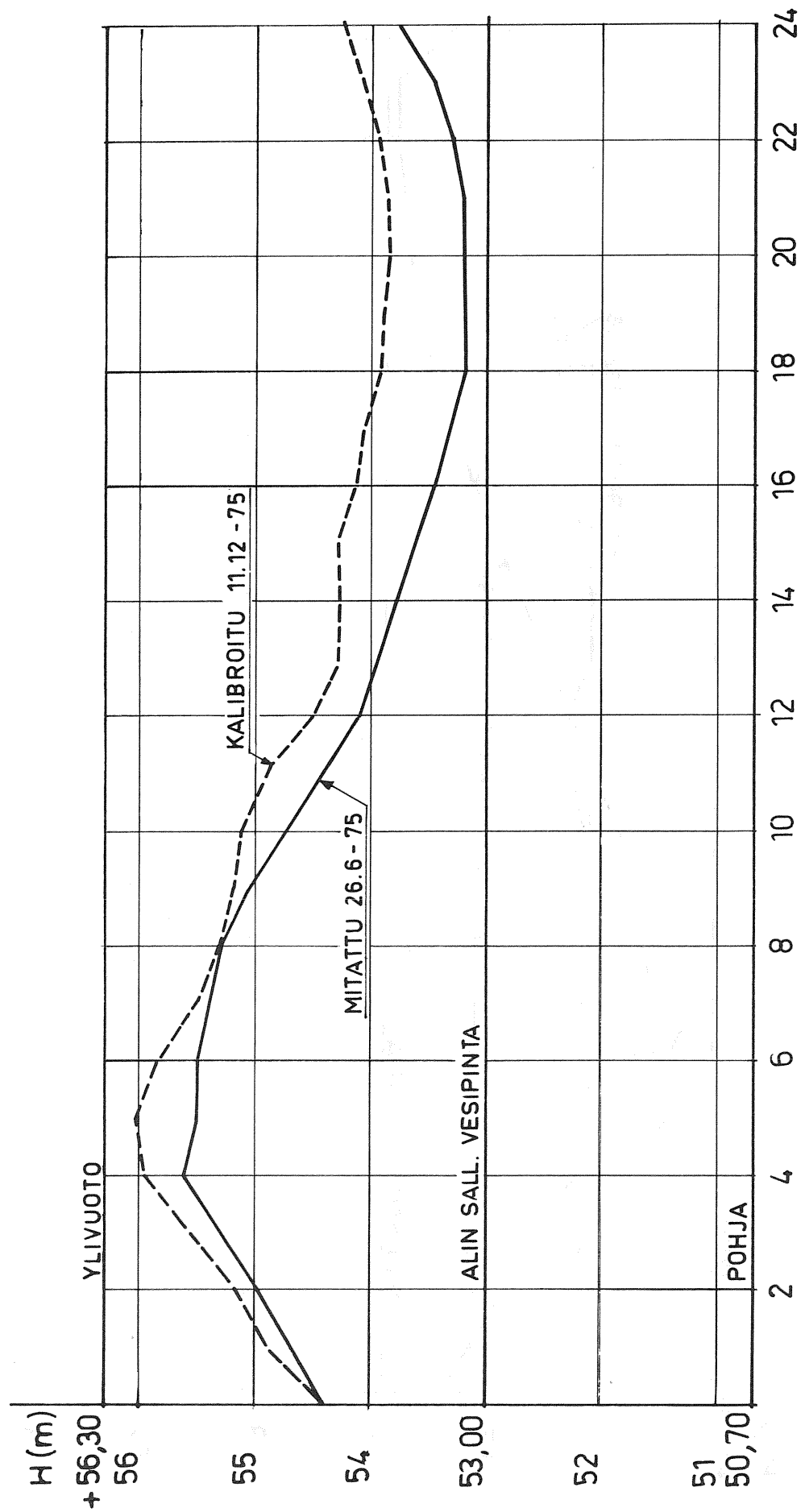
LA	4	414	454	D	0.86	471	D	0.64	472	D	0.30
LA	34	311	312	E	0.94	283	A	0.00	284	A	0.00
LA	35	281	282	A	0.57	293	A	0.39	301	A	0.05
LA	35	285	291	A	1.43	304	A	5.20	305	A	3.00
LA	35	302	303	A	0.36	332	A	1.59	341	A	3.45
LA	35	321	331	A	0.79	351	A	0.04	461	A	0.43
LA	35	342	351	A	0.03	352	A	0.05	461	A	0.14
LA	35	463	464	A	0.21	465	A	5.94	261	B	0.00
LA	20	231	241	B	0.66	251	B	2.14	383	C	0.00
LA	20	421	381	C	0.00	392	C	0.00	401	C	0.03
LA	5	371	391	C	1.21	413	C	2.03	441	C	0.43
LA	5	384	411	C	1.07	434	C	1.34	455	C	1.12
LA	5	402	433	C	0.18	453	C	0.37	494	C	0.09
LA	5	432	452	C	1.02	491	C	1.46			0.06
LA	5	451	473	C	0.21			1.17			2.34
LA	5	456		C	0.05			0.25			0.00
LA	5	541		C	0.00			0.00			0.00
LA	5	414		D	4.15	472	D	0.06			0.00
LA	5	414	471	D	0.19			0.00			0.00
LA	35	311	312	E	4.22	61	A	0.00	131	A	9.02
LA	30	41	51	A	13.25	161	A	1.46	172	A	0.14
LA	30	141	151	A	2.46	203	A	0.18	204	A	9.13
LA	30	181	201	A	0.02	31	B	16.09	71	B	3.41
LA	21	11	21	B	10.03	101	B	6.81	111	B	15.10
LA	21	81	91	B	0.50	121	B	0.34	122	B	0.25
LA	21	112	113	B	0.22			0.00	151	A	23.07
LA	21	211	221	B	4.20	141	A	27.76	281	A	0.04
LA	37	41	61	A	0.11	202	A	1.32	291	A	0.84
LA	37	161	181	A	8.77	204	A	4.61	341	A	0.13
LA	37	282	283	A	0.17	303	A	0.09	131	A	0.17
LA	37	292	301	A	0.51	403	A	0.81	112	B	3.23
LA	37	342	351	A	0.20	91	B	0.18	231	B	0.37
LA	22	11	71	B	1.40	221	B	0.04	421	B	0.43
LA	22	122	211	B	1.05	251	B	2.20	401	C	0.47
LA	22	241	251	B	1.90	392	C	0.04	452	C	1.19
LA	7	371	382	C	0.02	441	C	0.20			0.00
LA	7	431	432	C	1.04			0.10			0.00
LA	7	453	473	C	0.17	472	D	0.00			0.00
LA	7	414	454	D	1.31			0.00			0.00
LA	37	311		E	0.00			0.00			0.00
LA	36	41	131	A	0.32	151	A	0.15	172	A	0.02
LA	38	201	291	A	0.13	301	A	0.04	334	A	0.04
LA	30	341	465	A	0.03			0.00			0.00
LA	23	21	241	B	2.73	71	B	0.71	113	B	0.20
LA	23	221	31	B	0.75	251	B	0.23	412	C	0.00
LA	381	382	382	C	0.02	303	C	0.02			0.00
LA	3	433	453	C	0.13	541	C	0.07			0.00
LA	39	41	51	A	4.04	61	A	0.12	131	A	8.13
LA	39	141	151	A	14.20	161	A	2.23	907	A	4.53
LA	39	201	202	A	3.14	282	A	1.00	283	A	0.02
LA	39	284	291	A	0.80	293	A	2.00	294	A	0.16
LA	39	301	302	A	0.66	304	A	0.04	305	A	0.86
LA	39	321	331	A	0.02	341	A	0.69	342	A	0.21
LA	39	351	463	A	0.05			0.00			0.00
LA	24	11	21	B	5.52	31	B	5.00	71	B	0.03
LA	24	81	91	B	0.05	101	B	0.02	112	B	3.36
LA	24	113	121	B	0.97	122	B	1.00	211	B	3.99
LA	24	221	231	B	4.17	241	B	0.26	251	B	0.61
LA	24	261	421	B	1.30			0.00			0.00
LA	9	362	381	C	1.22	391	C	0.56	392	C	0.23
LA	9	411	431	C	0.05	432	C	0.29	433	C	0.85
LA	9	434	441	C	0.03	451	C	0.12	455	C	0.05
LA	9	450	491	C	0.57			0.00			0.00
LA	9	454	471	D	0.02			0.00			0.00

TKK	LASKENTAKESKUS	OTANIEMI	DATE	PAGE
LA 39	311	E	120975	25
LA 40	41	A	131	00
LA 40	111	A	02	26
LA 40	284	A	201	43.00
LA 40	283	A	291	49
LA 40	384	A	342	08
LA 40	463	A	00	00
LA 25	11	B	81	1.41
LA 25	91	B	121	1.57
LA 25	122	B	231	21.25
LA 25	251	B	00	00
LA 10	341	C	382	1.00
LA 10	382	C	392	2.41
LA 10	402	C	434	2.00
LA 10	451	C	541	1.26
LA 10	471	D	00	00
LA 40	311	E	00	00
LA 11	683P	C	00	00
LA 42	592	A	00	00
LA 12	591	C	00	00

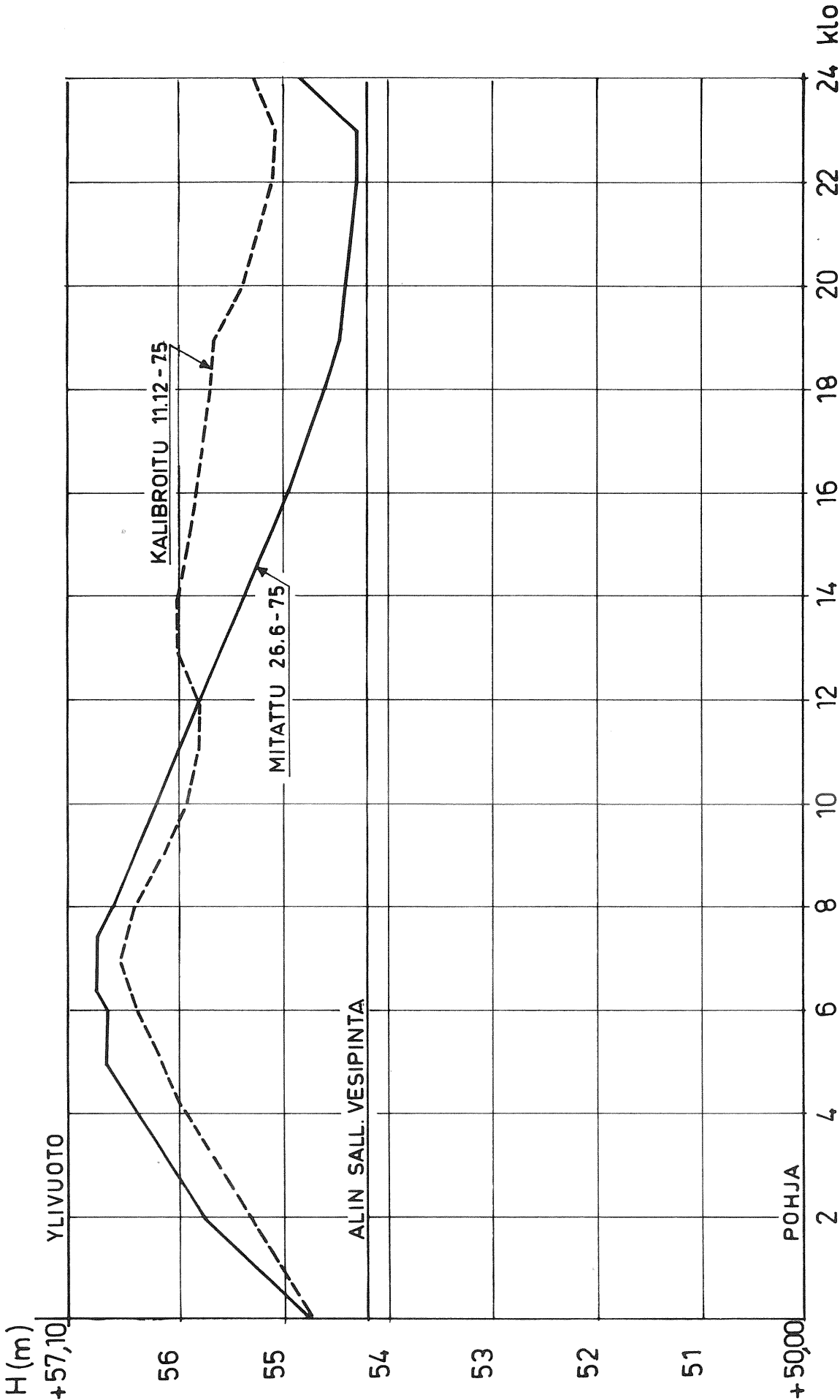
702 A ILMALA, SÄILIÖKÄYRÄ (+ 61,00 – 68,50)



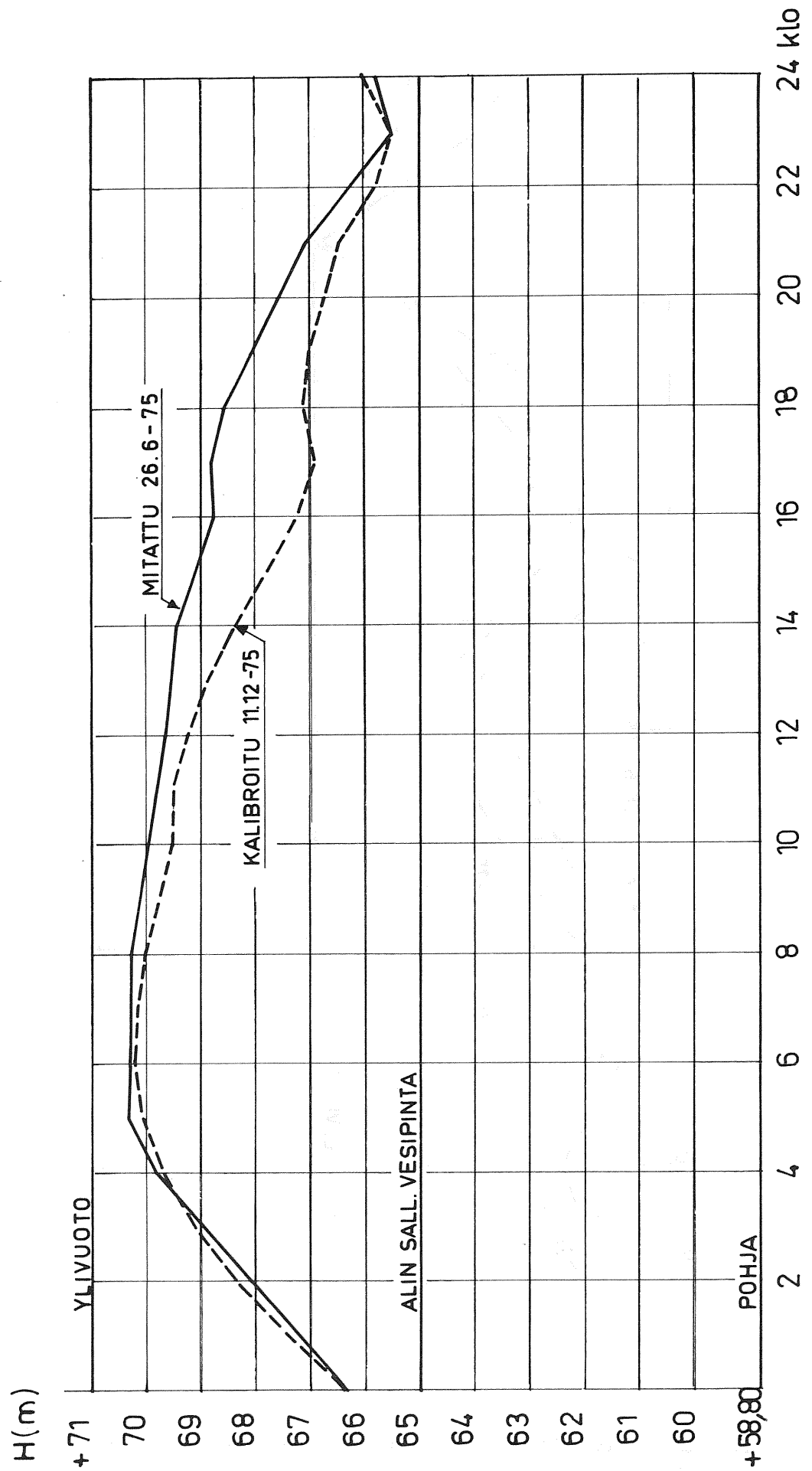
703 B ALPILA, SÄILIÖKÄYRÄ (+50,70 – 56,30)



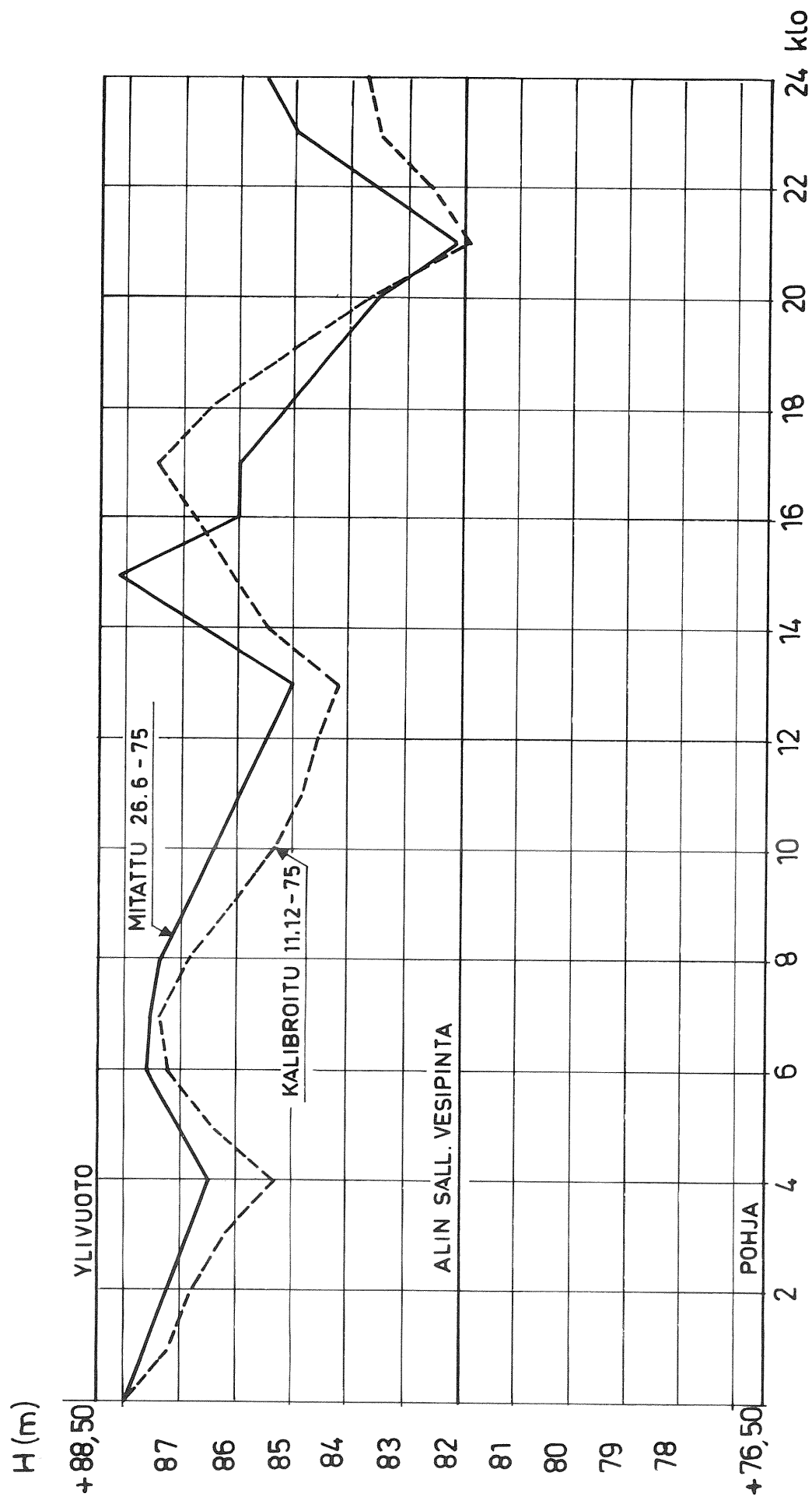
704 E LAUTTASAARI, SÄILIÖKÄYRÄ (+50,00 – 57,10)



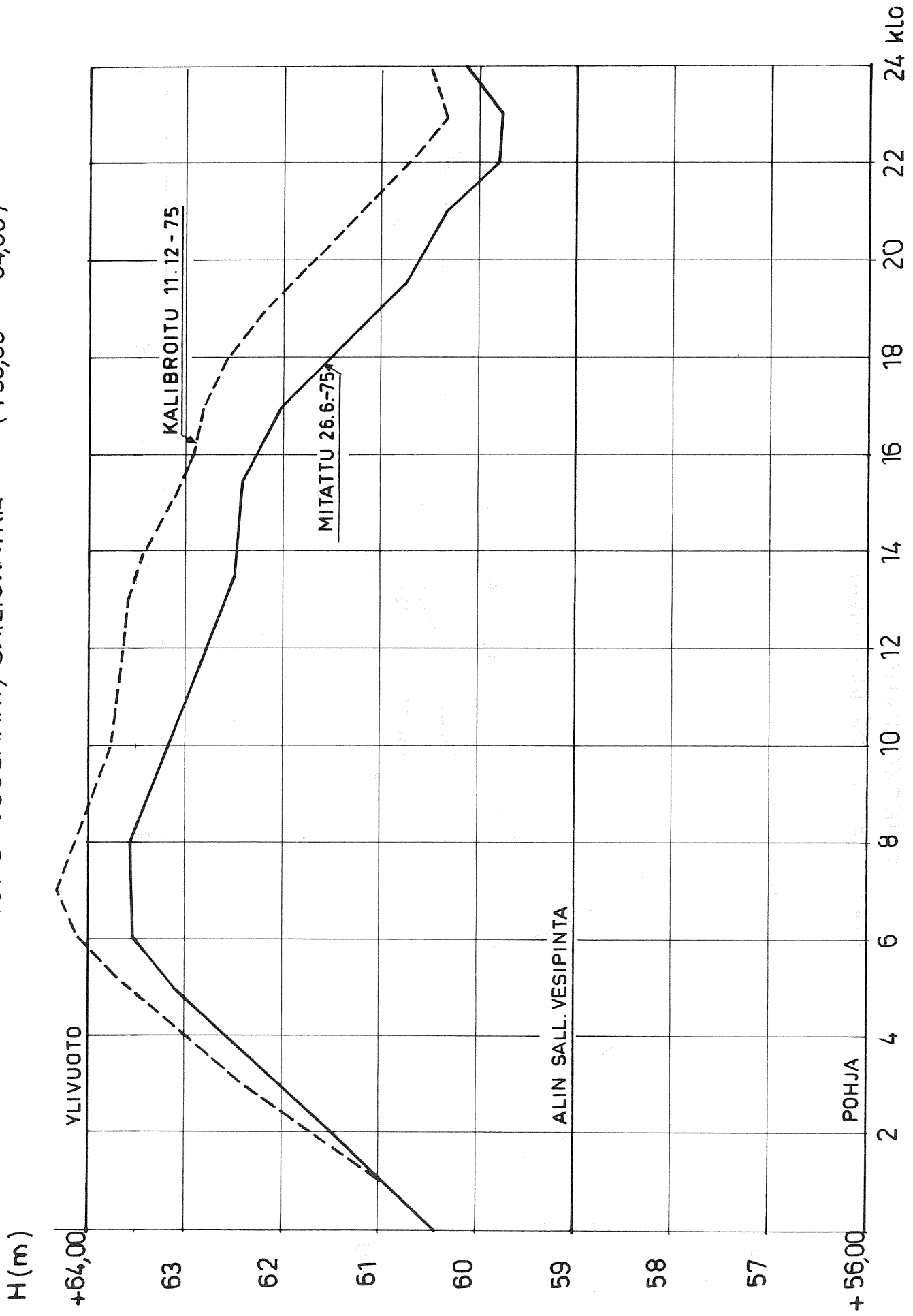
705 C MYLLYPURO, ALEMPI SÄILIÖ, SÄILIÖKÄYRÄ (+58,80 - 71,00)



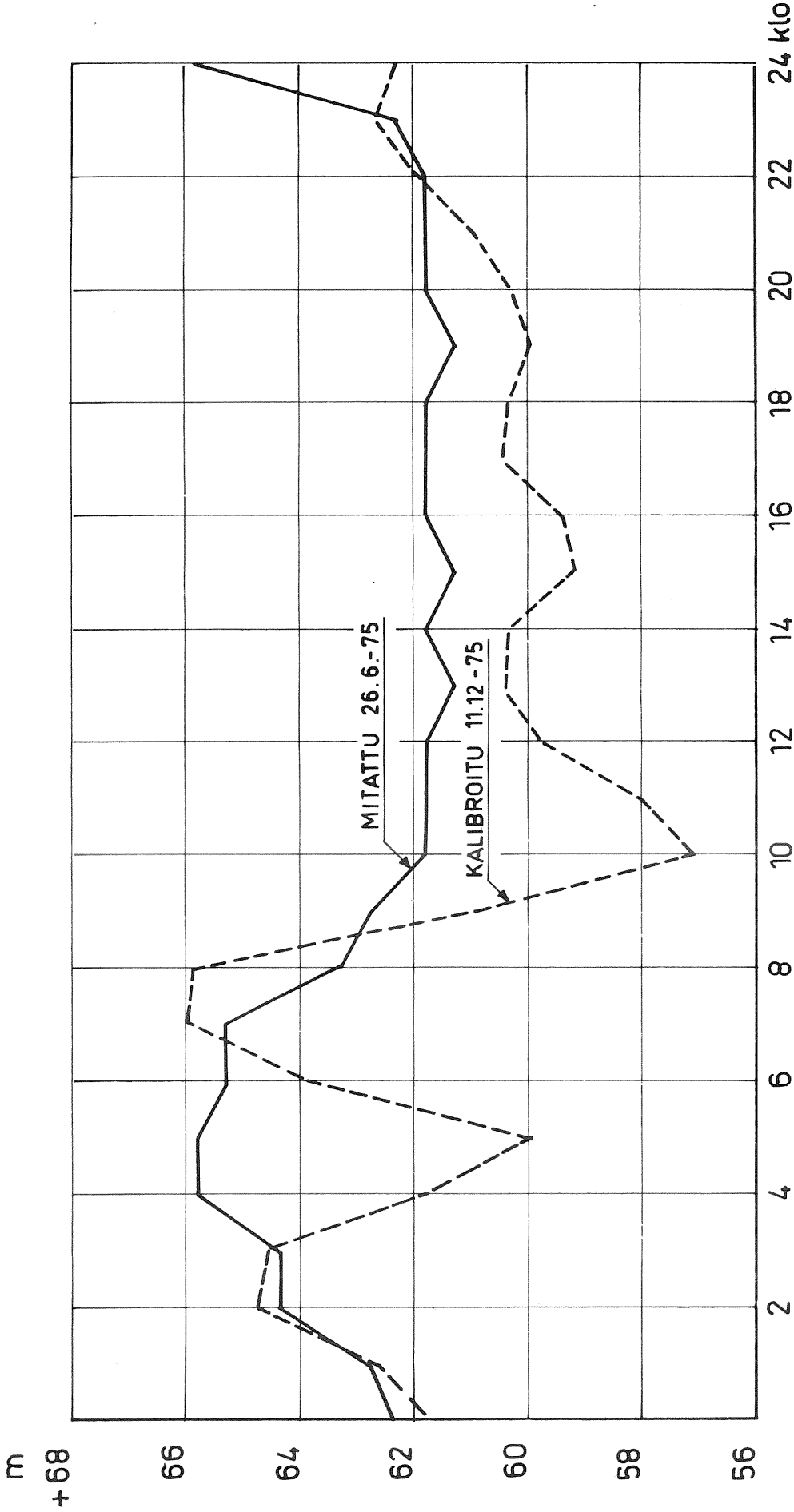
706 D MYLLYPURO, YLEMPI SÄILIÖ, SÄILIÖKÄYRÄ (+ 76,50—88,50)



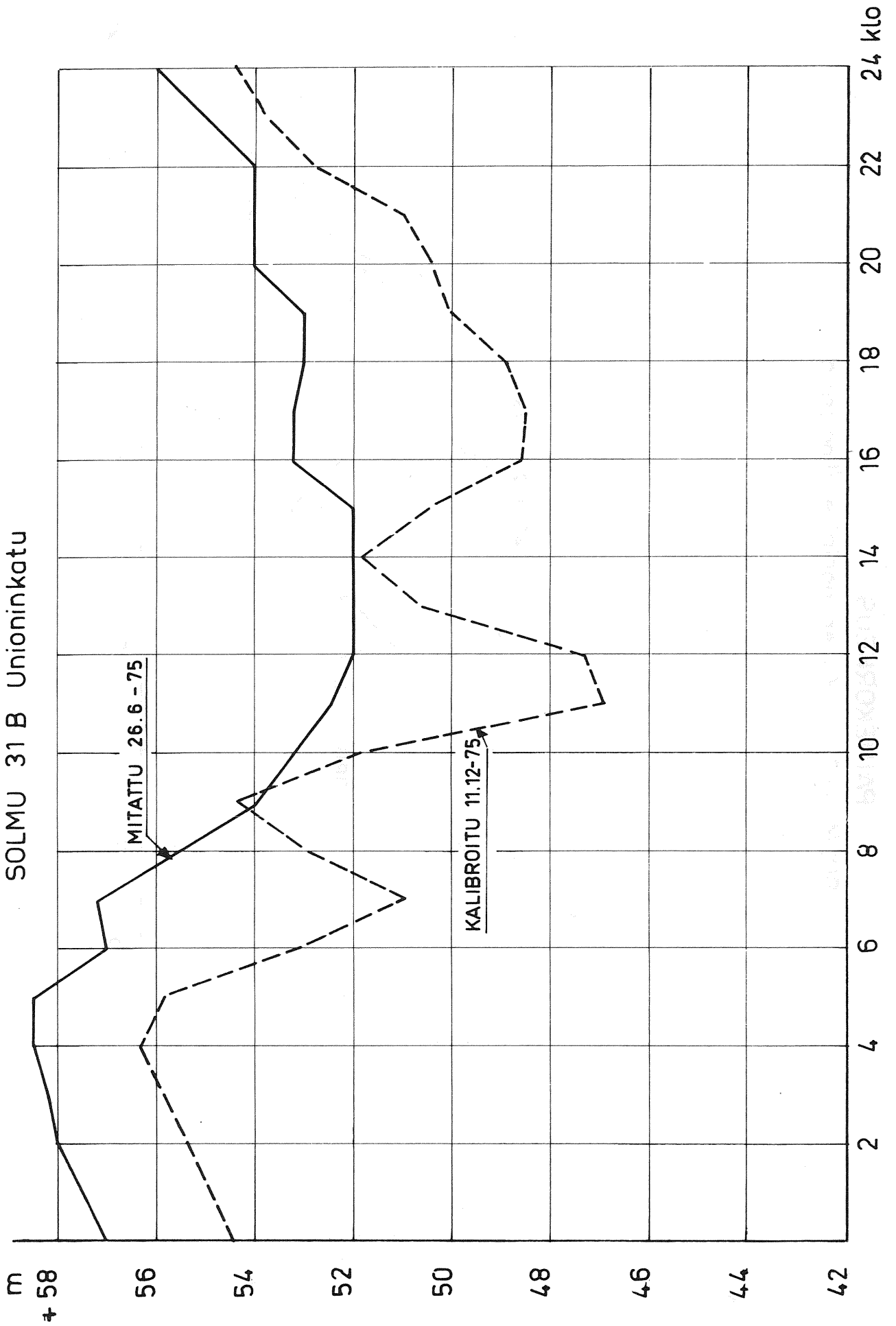
707 C VUOSAARI, SÄILIÖKÄYRÄ (+56,00 — 64,00)



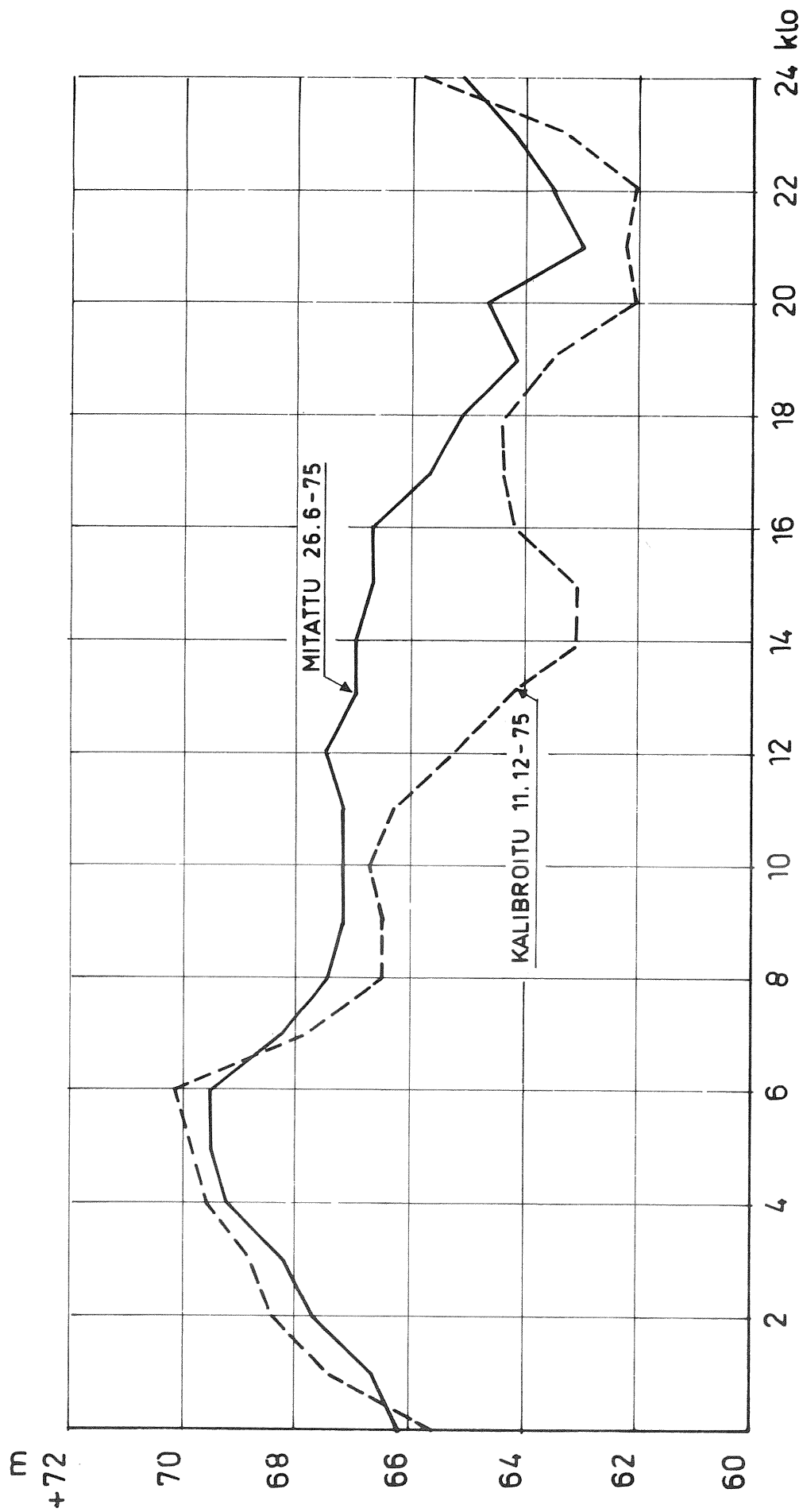
PAINEKORKEUS
SOLMU 621 A Porkkalankatu



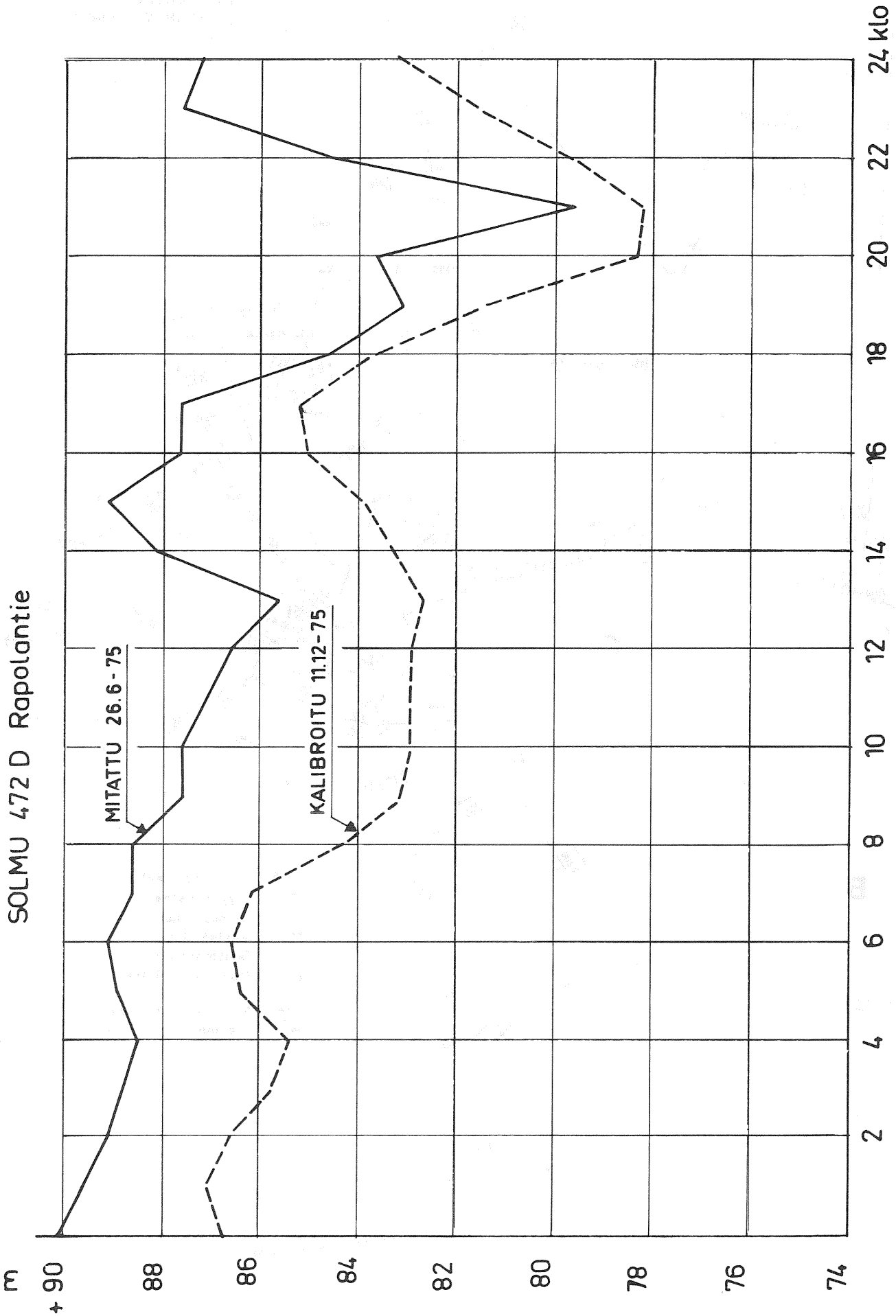
PAINEKORKEUS
SOLMU 31 B Unioninkatu



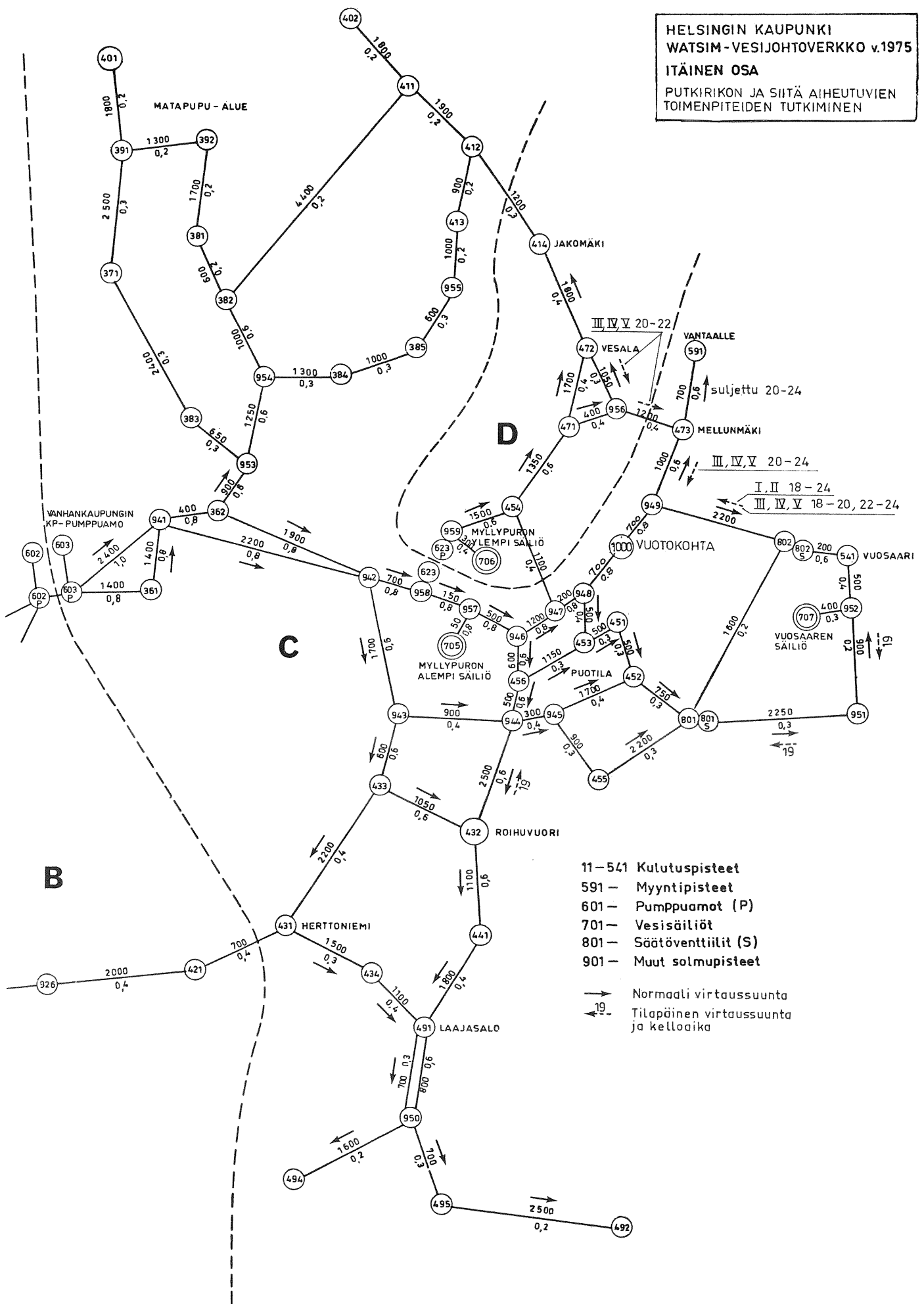
PAINEKORKEUS SOLMU 491 C Kuvernöörintie (Laajasalo)



PAINEKORKEUS
SOLMU 472 D Rapolantie

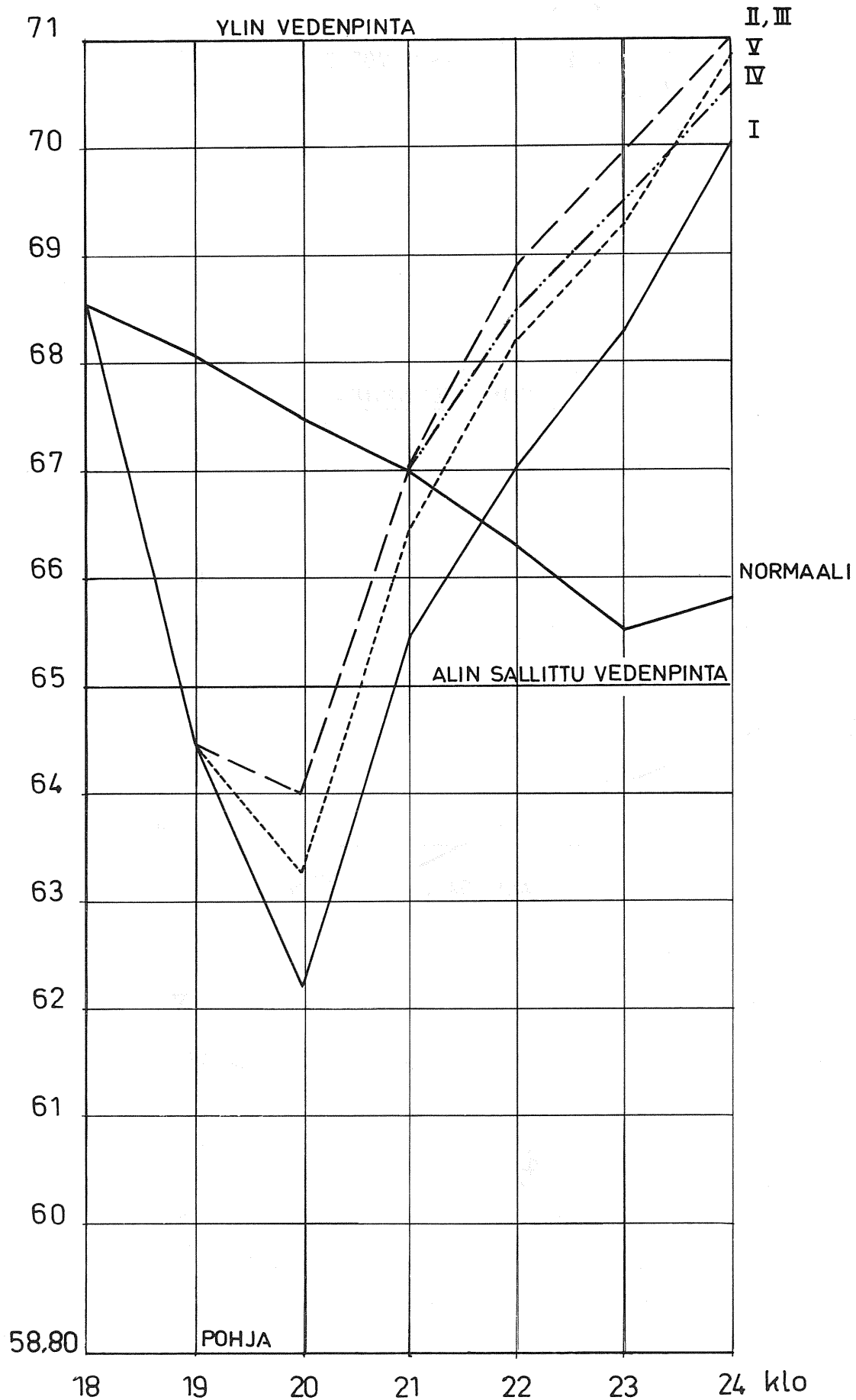


HELSINGIN KAUPUNKI
WATSIM - VESIJOHTOVERKKO v.1975
ITÄINEN OSA
 PUTKIRIKON JA SIITÄ AIHEUTUVIEN
 TOIMENPITEIDEN TUTKIMINEN



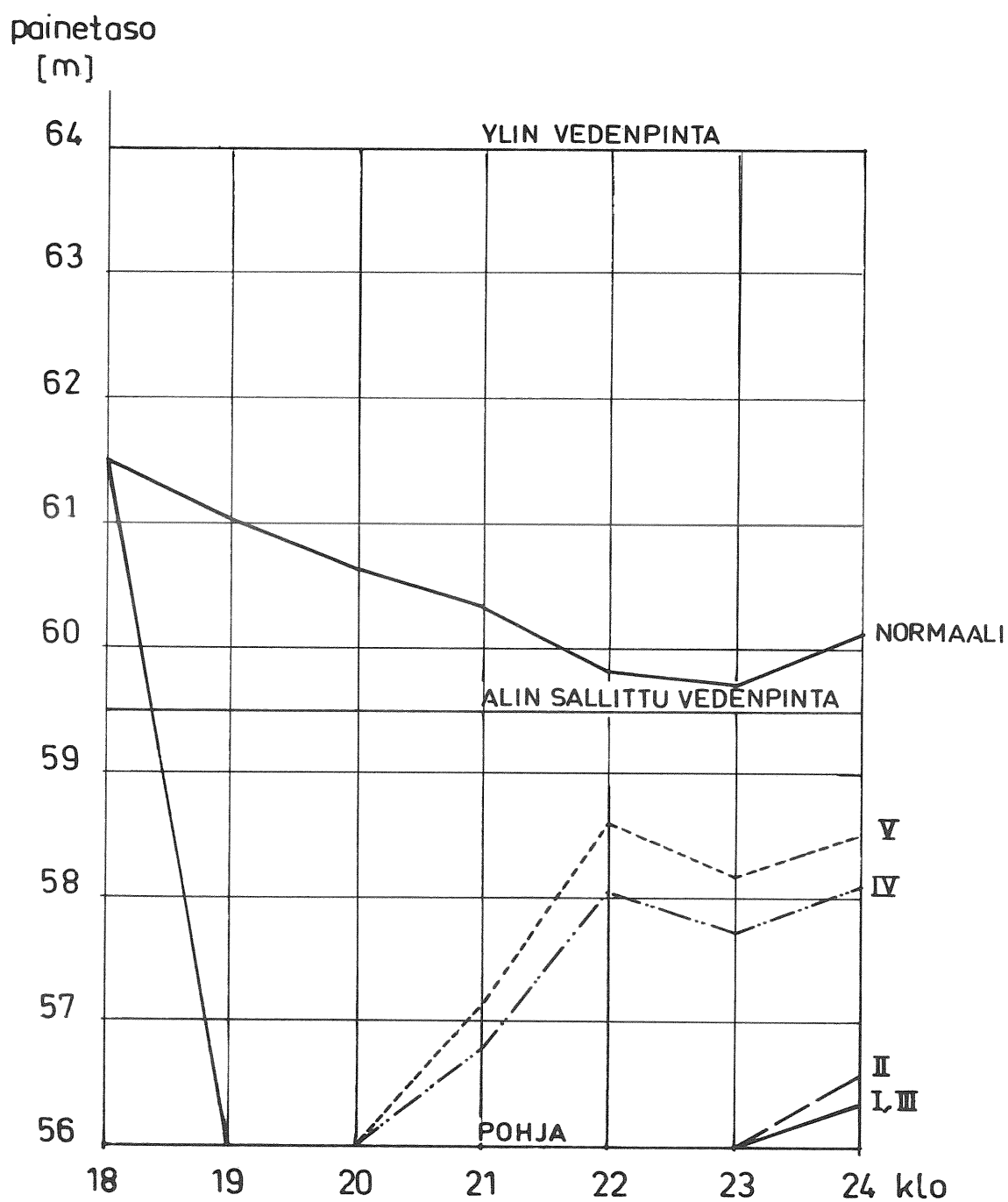
painetaso
[m]

PUTKIRIKKO
MYLLYPURON ALEMPI SÄILIÖ
TILANNE SÄILIÖSSÄ 705 C



PUTKIRIKKO

TILANNE SÄILIÖSSÄ 707 C
(VUOSAARI)



PUTKIRIKKO
TILANNE SÄILIÖSSÄ 706 D
(MYLLYPURON YLEMPI SÄILIÖ)

painetaso
[m]

88,50

YLIN VEDENPINTA

88

87

V

86

III

NORMAALI

85

IV

84

83

82

ALIN SALLITTU
VEDENPINTA

81

80

79

78

77

76,50

POHJA

18

19

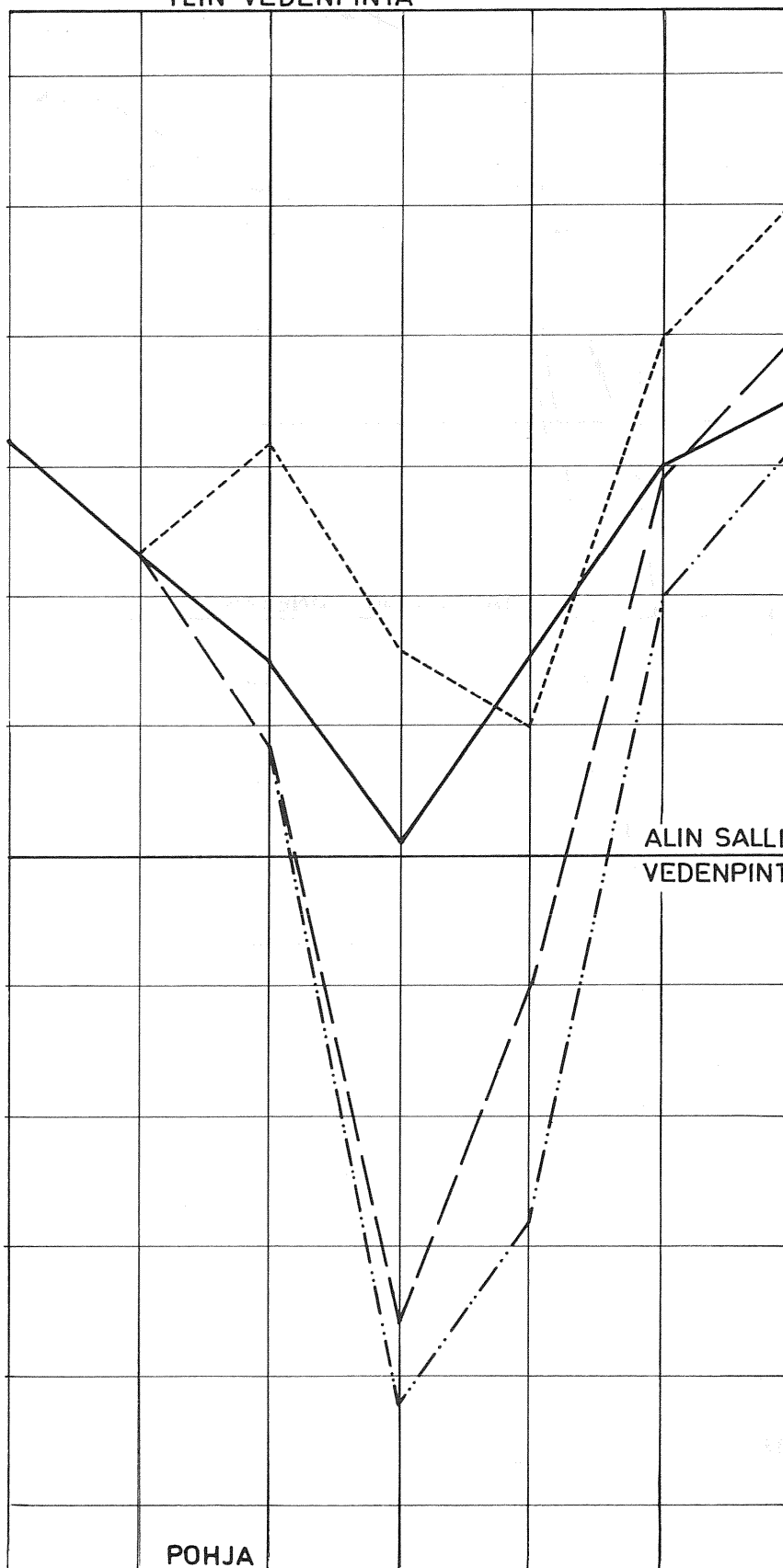
20

21

22

23

24 klo



PUTKIRIKKO TILANNE SOLMUSSA 452 C (PUOTILA)

HKV LIITE 26

painetaso [m]

70

65

60

55

50

45

40

18

19

20

21

22

23

24 klo

NORMAALI

TARVITTAVA PAINETASO

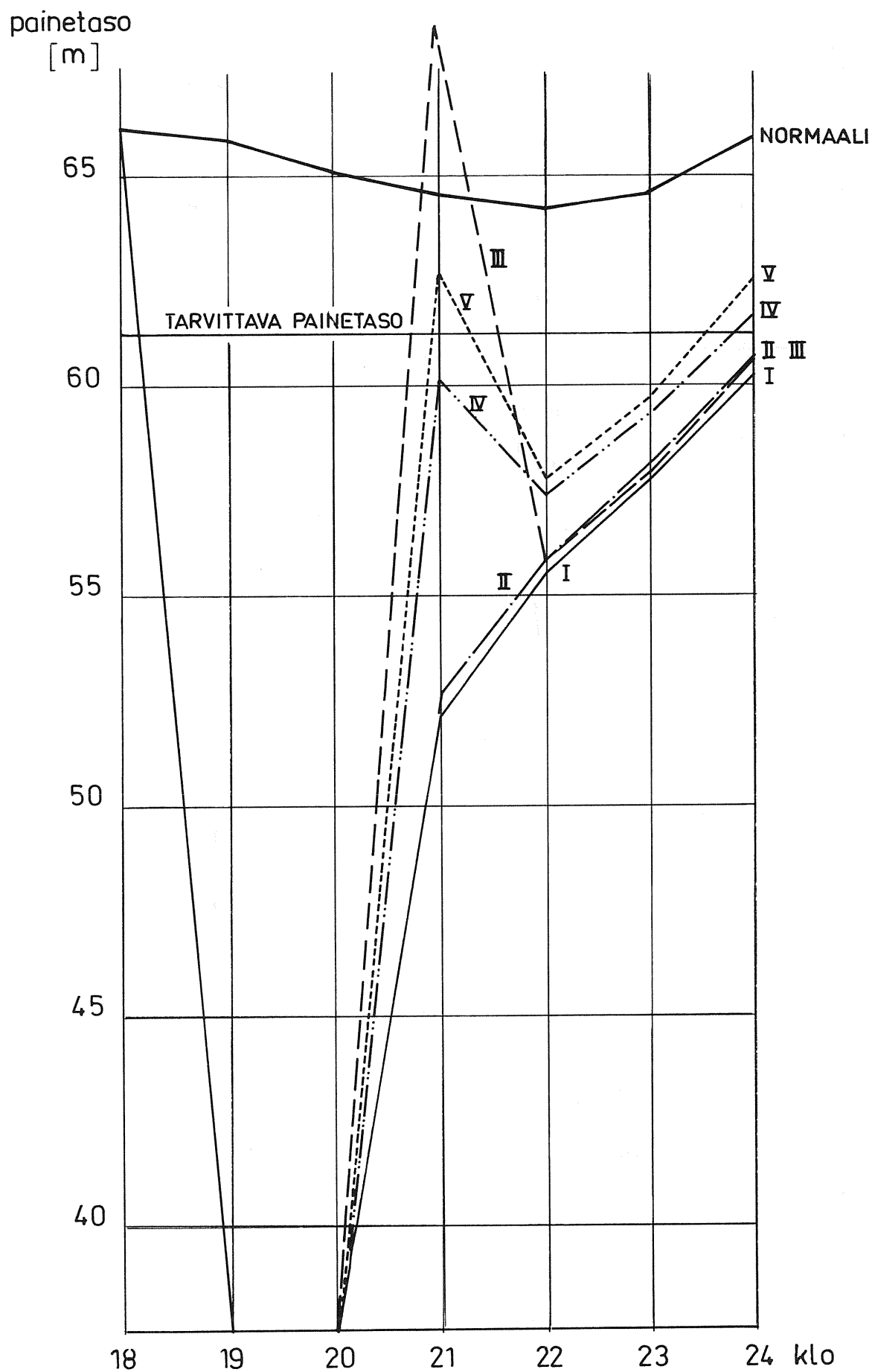
II
IV, V
III
I



PUTKIRIKKO

TILANNE SOLMUSSA 473 C (MELLUNMÄKI)

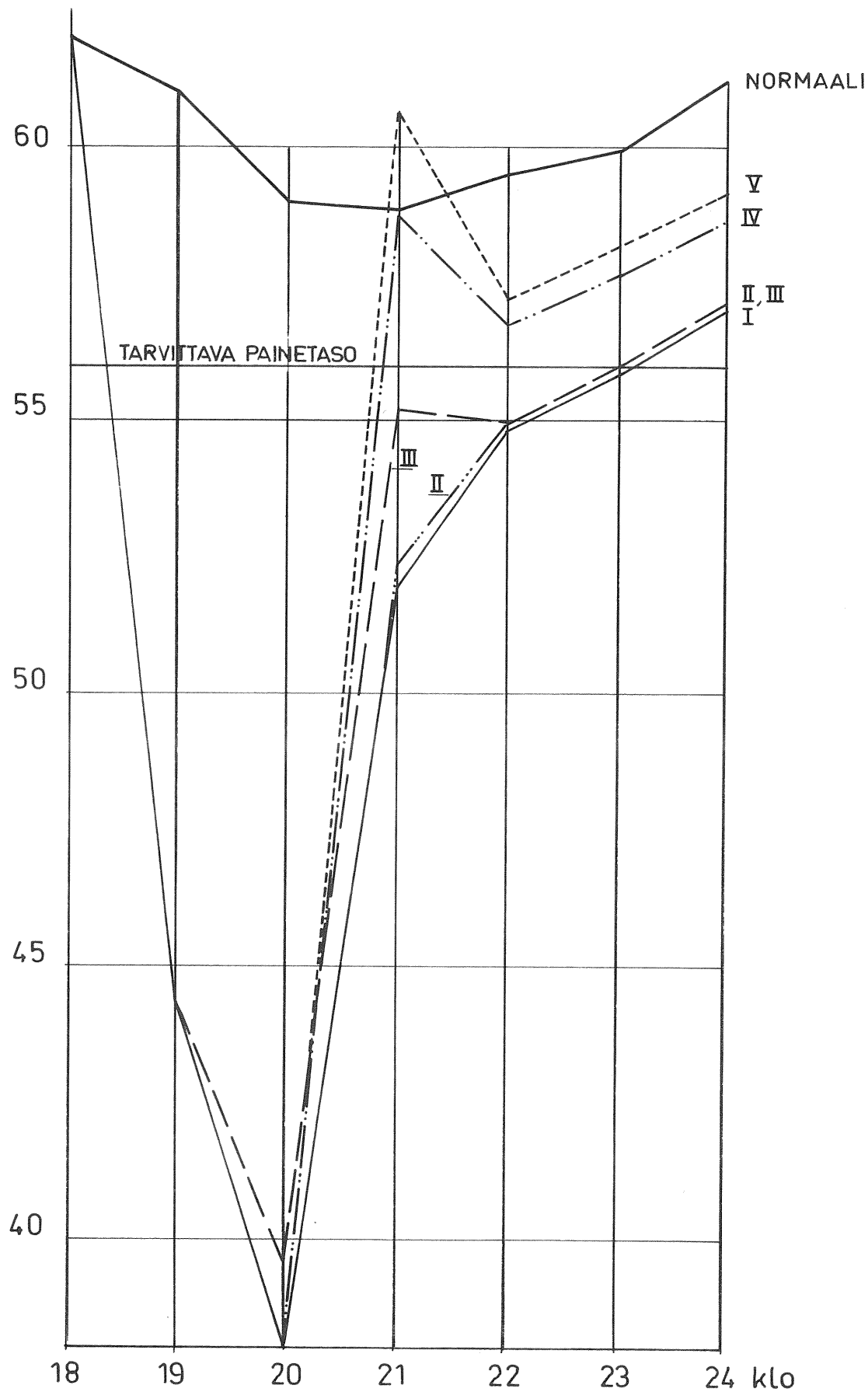
HKV LIITE 27



PUTKIRIKKO

painetaso
[m]

TILANNE SOLMUSSA 541 C
(VUOSAARI)



PUTKIRIKKO
TILANNE SOLMUSSA 432 C
(ROIHUVUORI)

painetaso

[m]

72

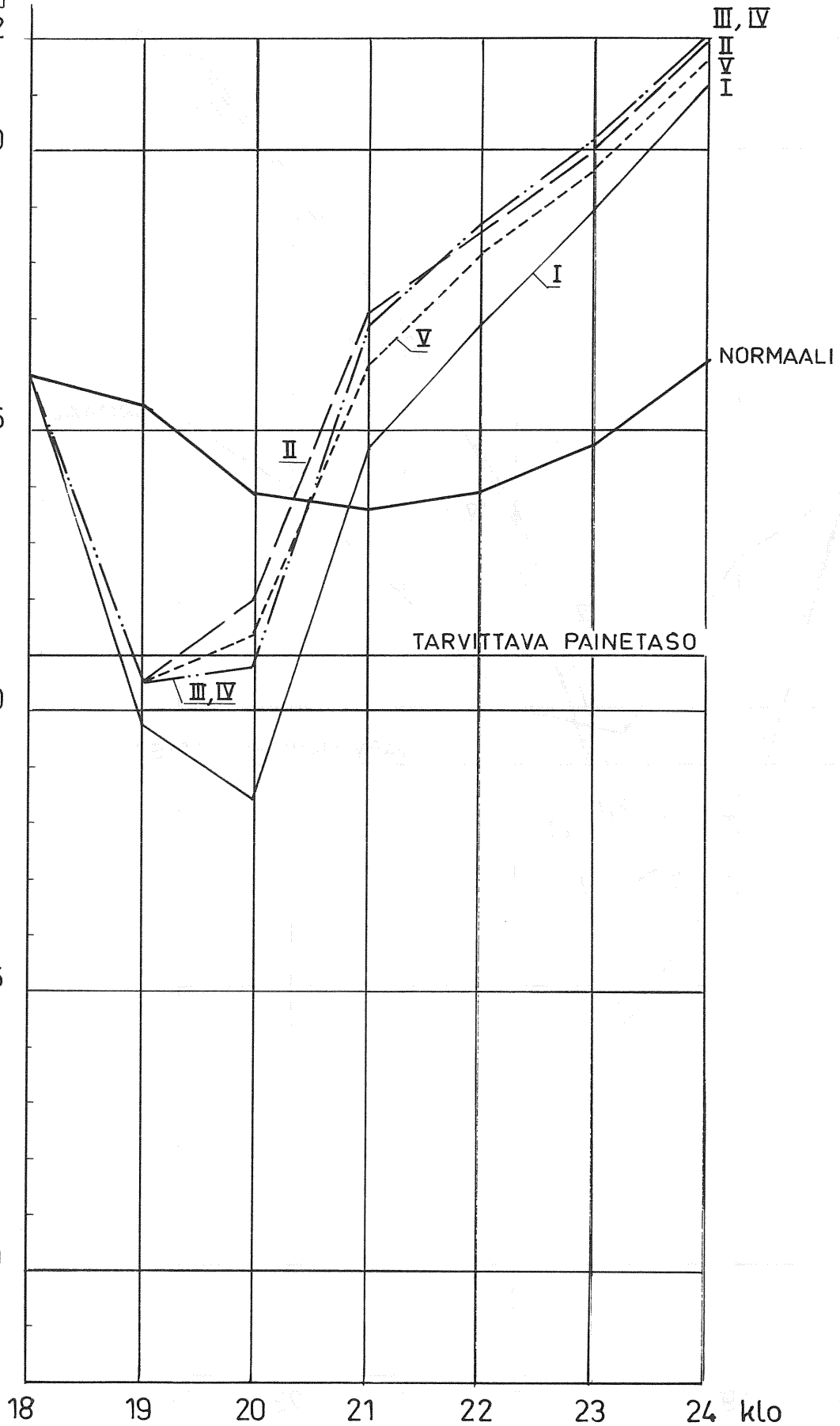
70

65

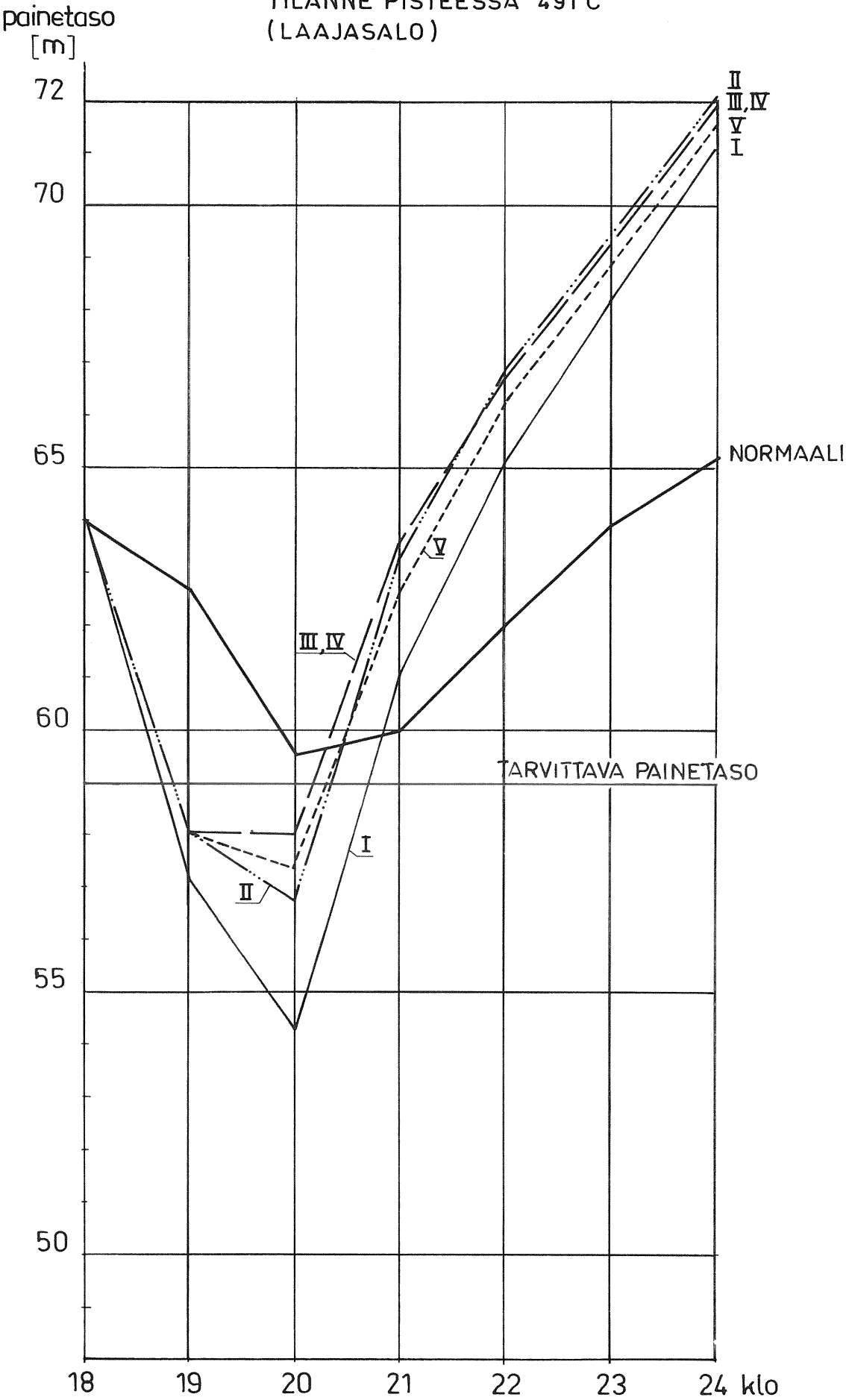
60

55

50



PUTKIRIKKO
TILANNE PISTEESSÄ 491 C
(LAAJASALO)

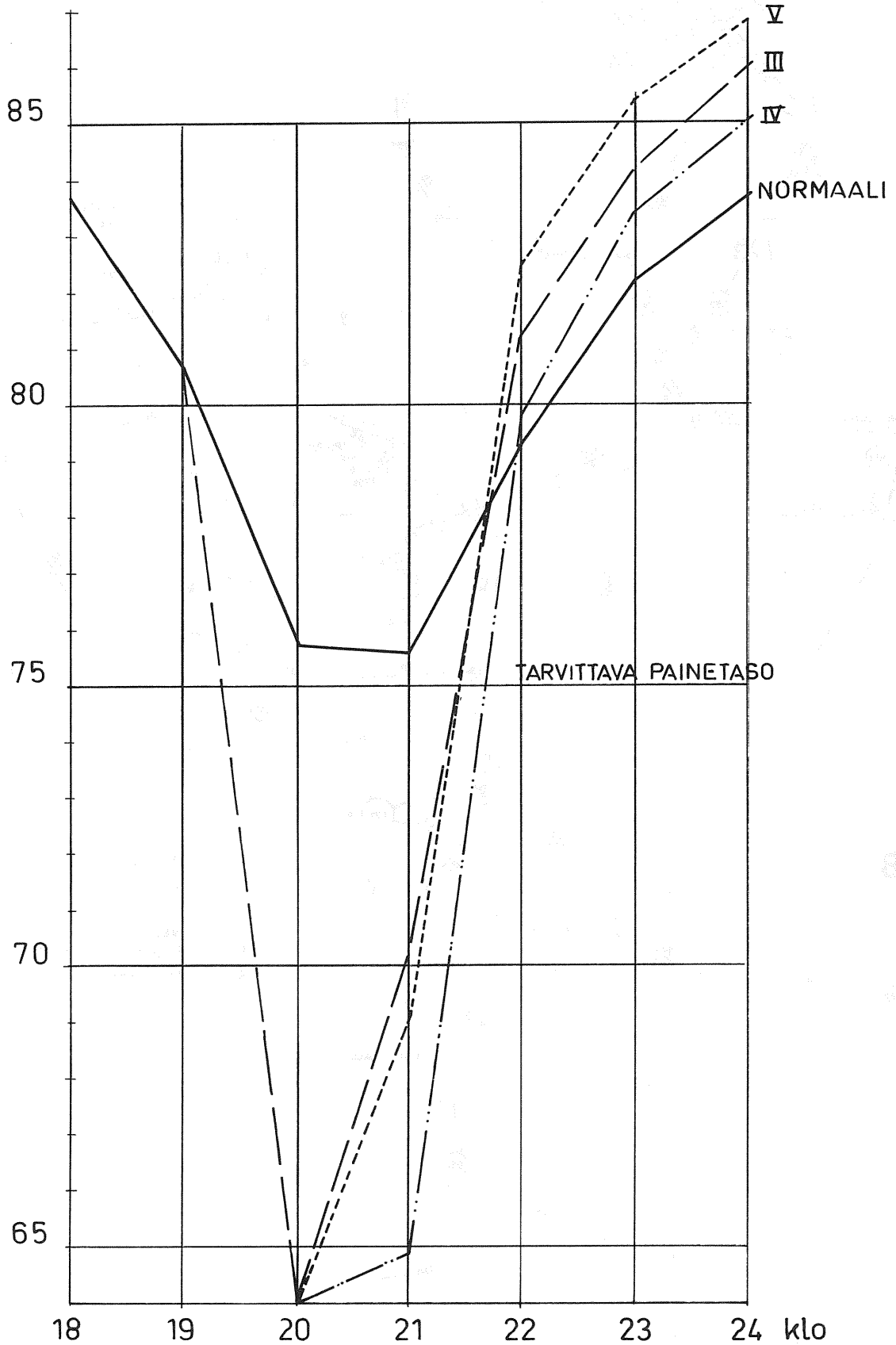


PUTKIRIKKO

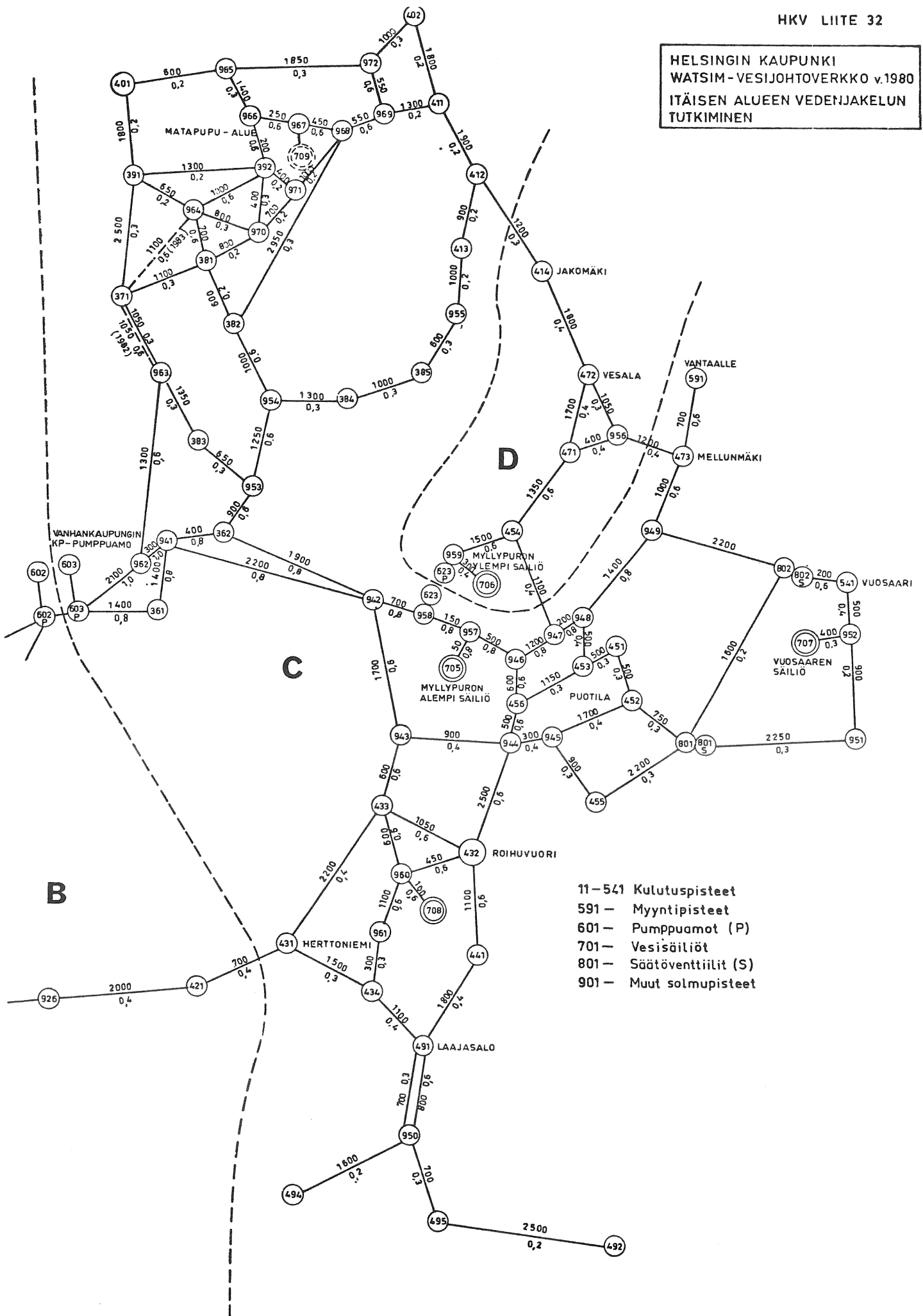
TILANNE SOLMUSSA 472 D
(VESALA)

painetaso

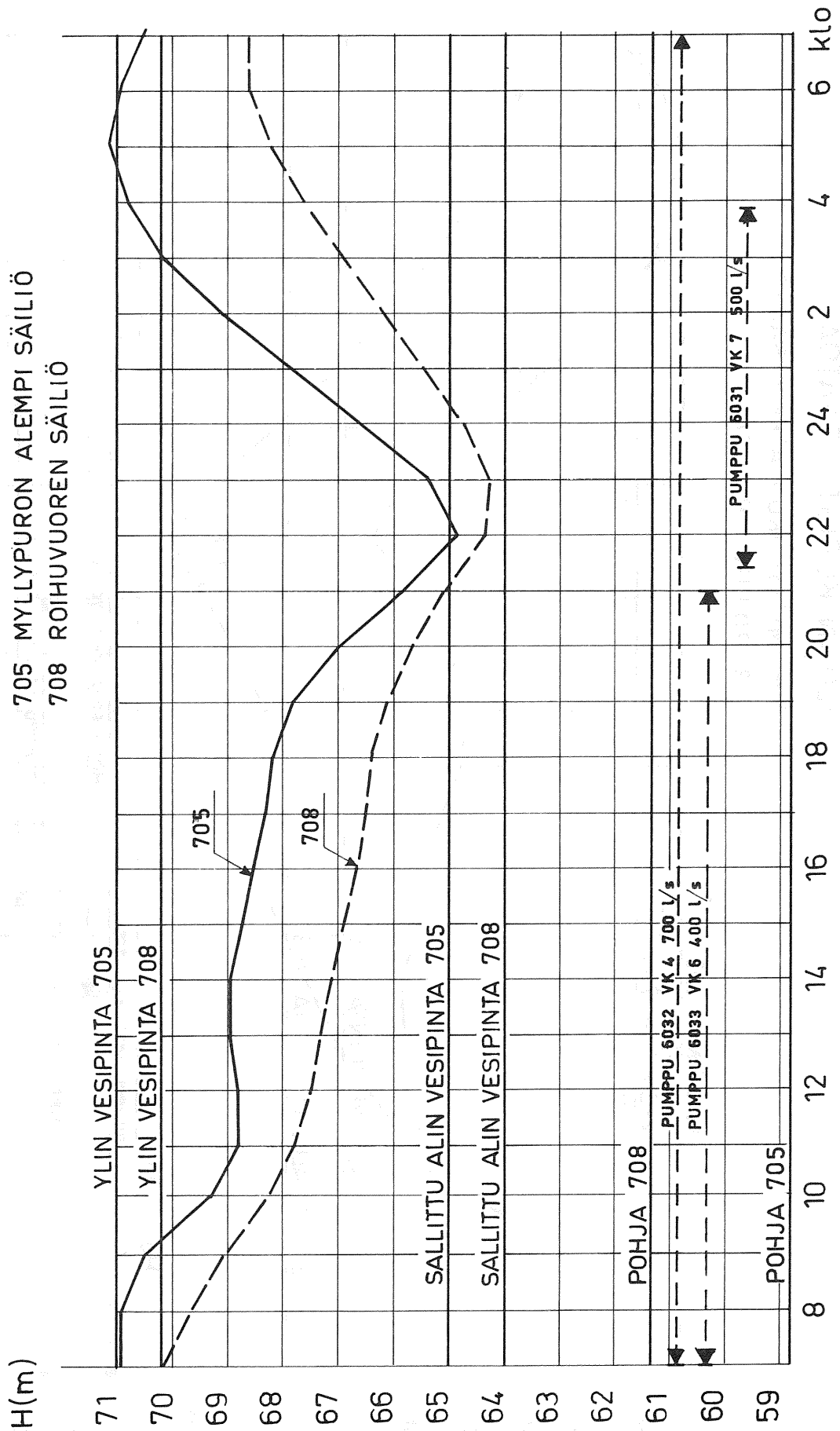
[m]



HELSINGIN KAUPUNKI
WATSIM-VESIJOHTOVERKKO v.1980
ITÄISEN ALUEEN VEDENJAKELUN
TUTKIMINEN

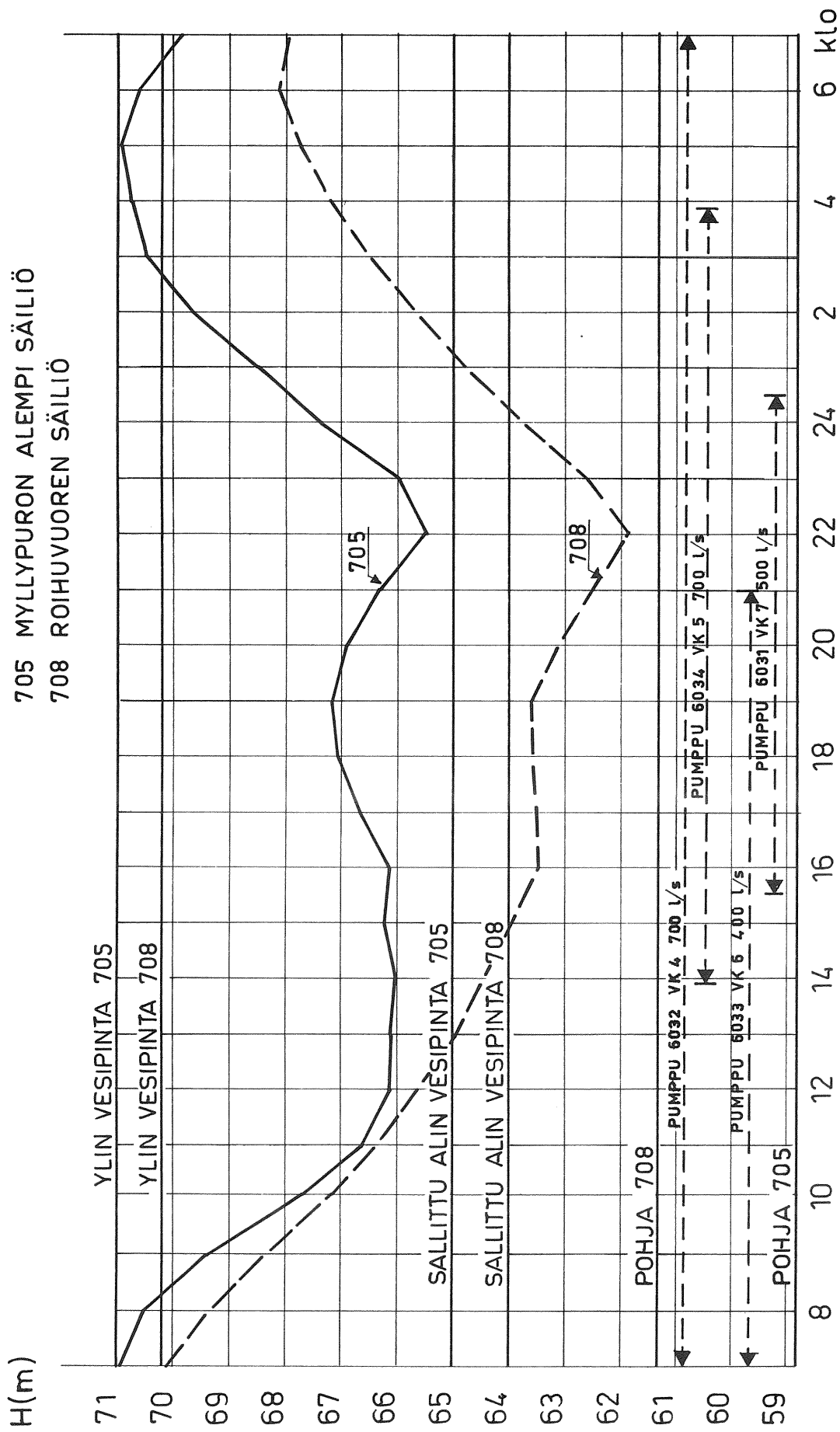


1980 – TILANNE (ajo 17.11.1975)
ILMAN KURISTUSSÄÄTÖÄ

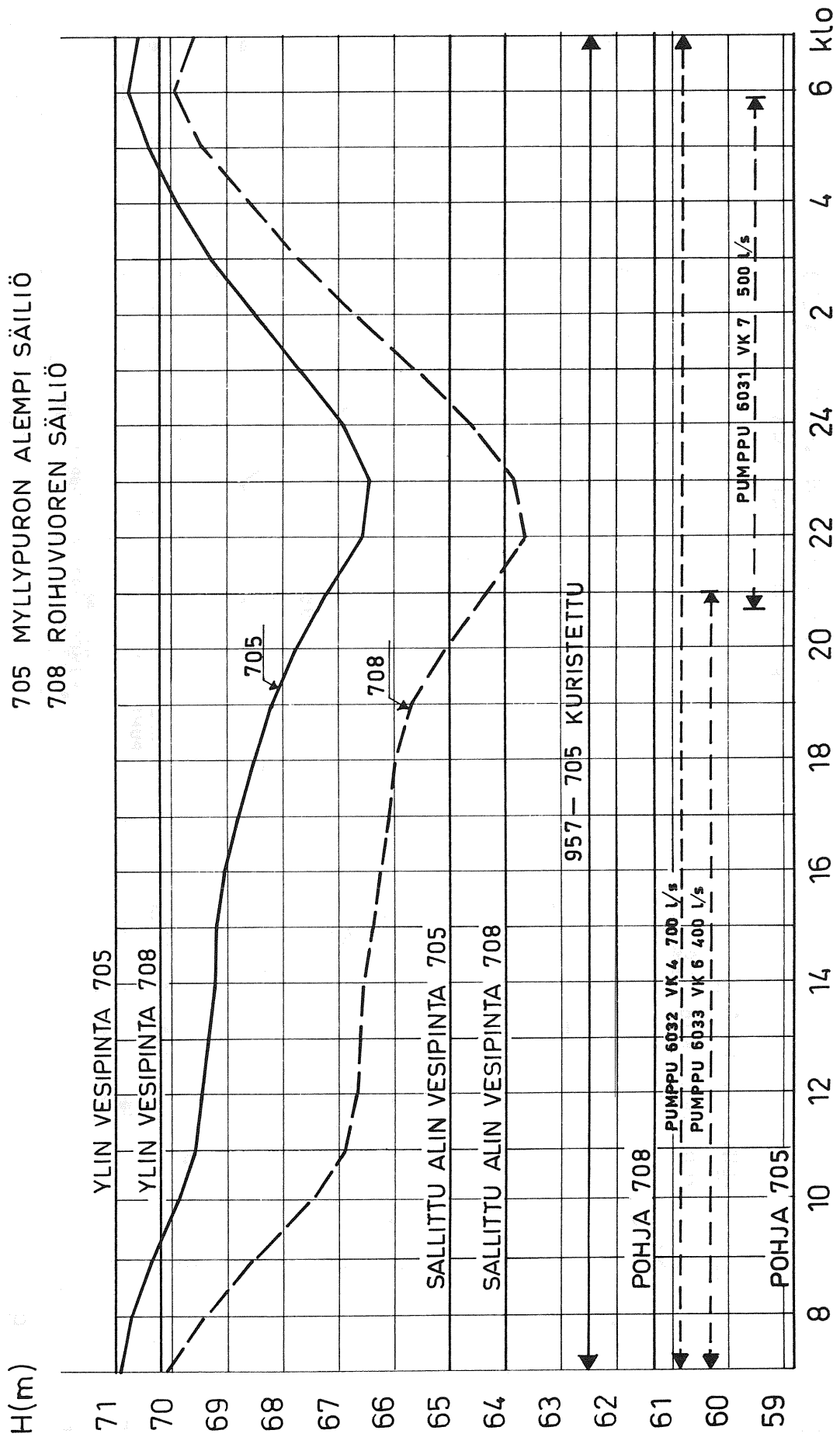


1985 – TILANNE (ajo 18.11.-75)
ILMAN KURISTUSSÄÄTÖÄ

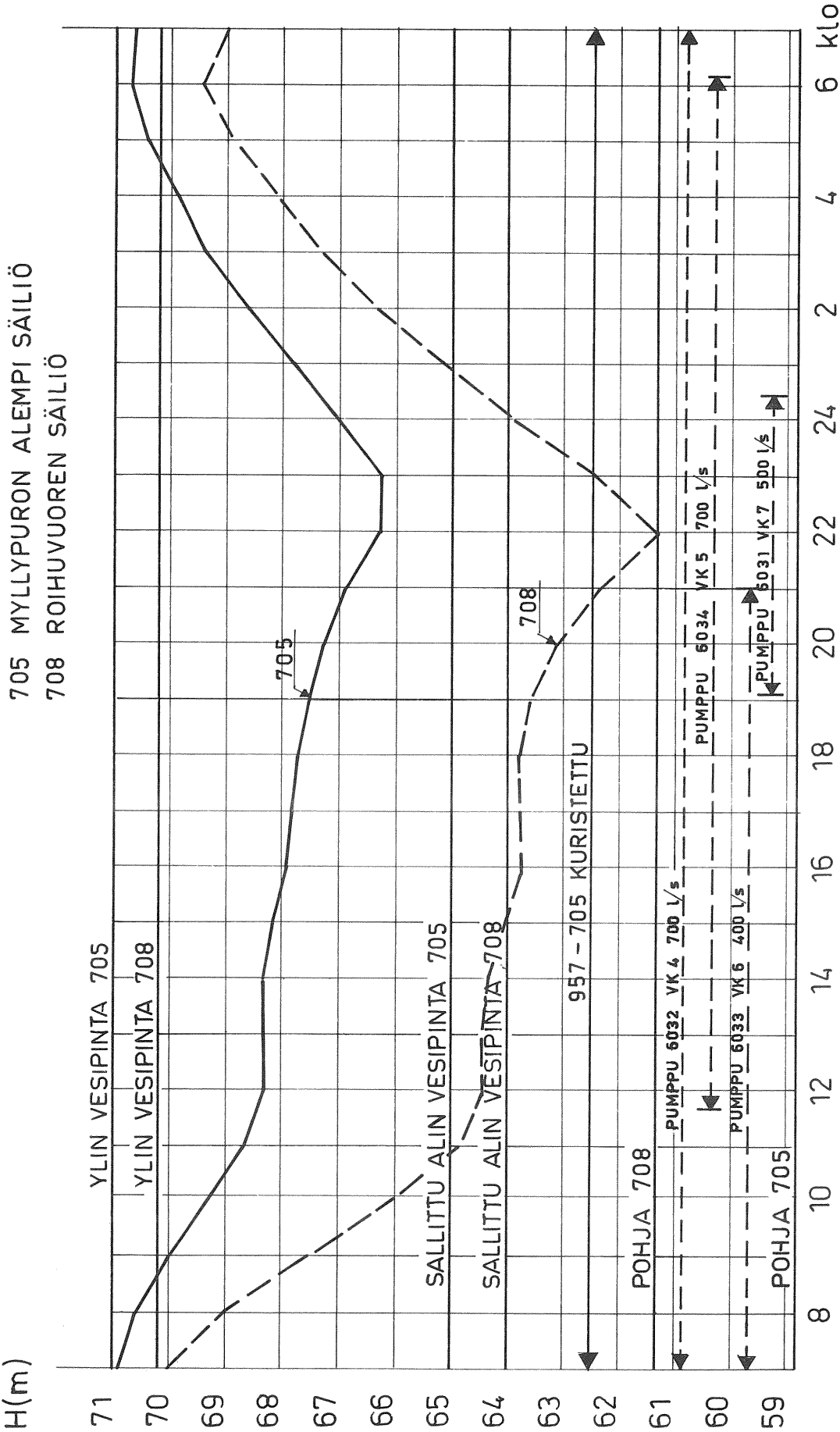
705 MYLLYPURON ALEMPI SÄILIÖ
708 ROIHUVUOREN SÄILIÖ



1980 – TILANNE (ajo 24.11 – 75)
 SÄÄTÖ 957 – 705 $\phi = 0,6$ L = 1500 klo 7–7
 705 MYLLYPURON ALEMPI SÄILIÖ
 708 ROIHUVUOREN SÄILIÖ

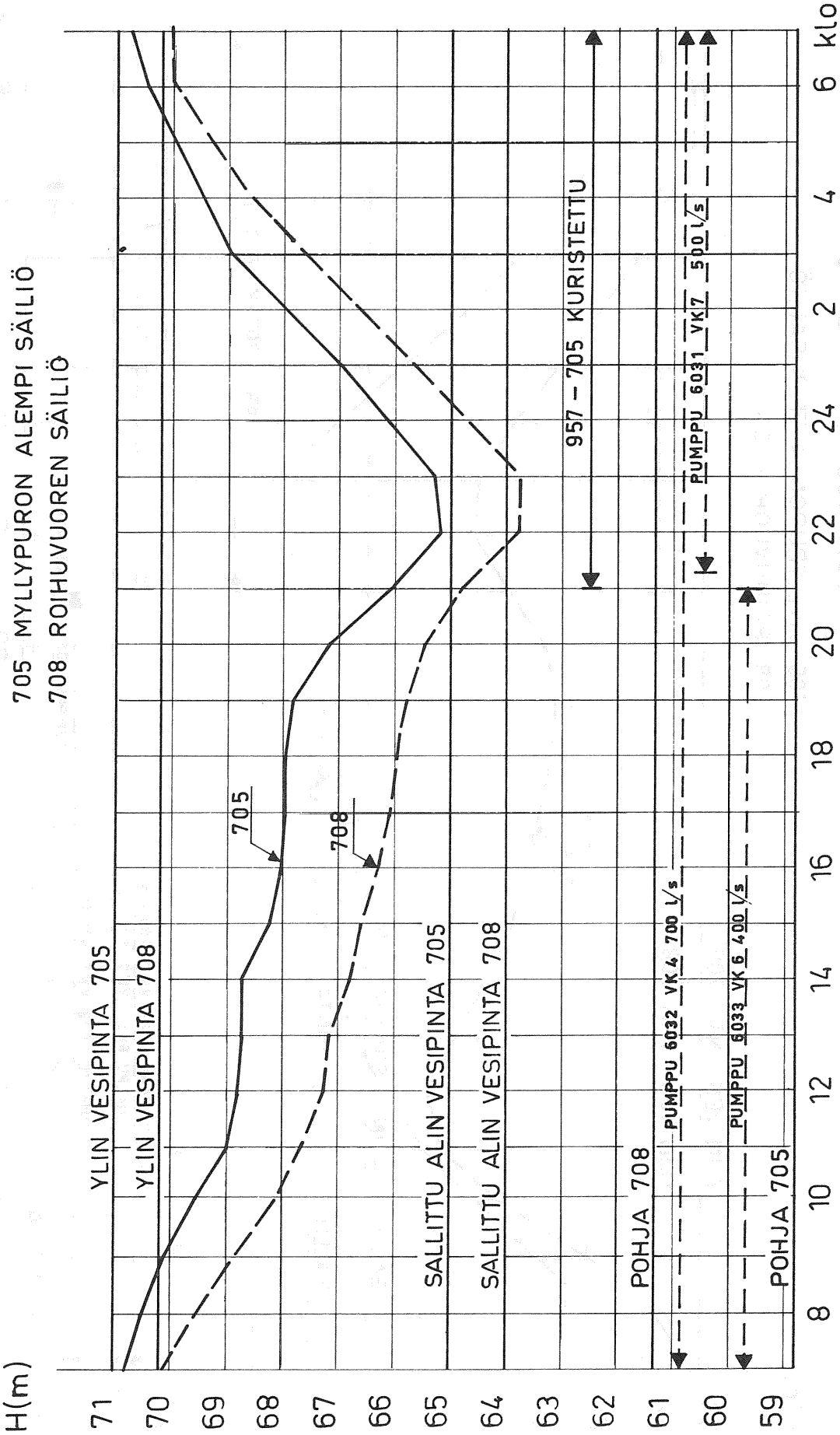


1985 - TILANNE (ajo 24.11-75)
SÄÄTÖ 957 - 705 $\phi = 0,6$ L=1500 klo 7-7
705 MYLLYPURON ALEMPI SÄILIÖ
708 ROIHUVUOREN SÄILIÖ

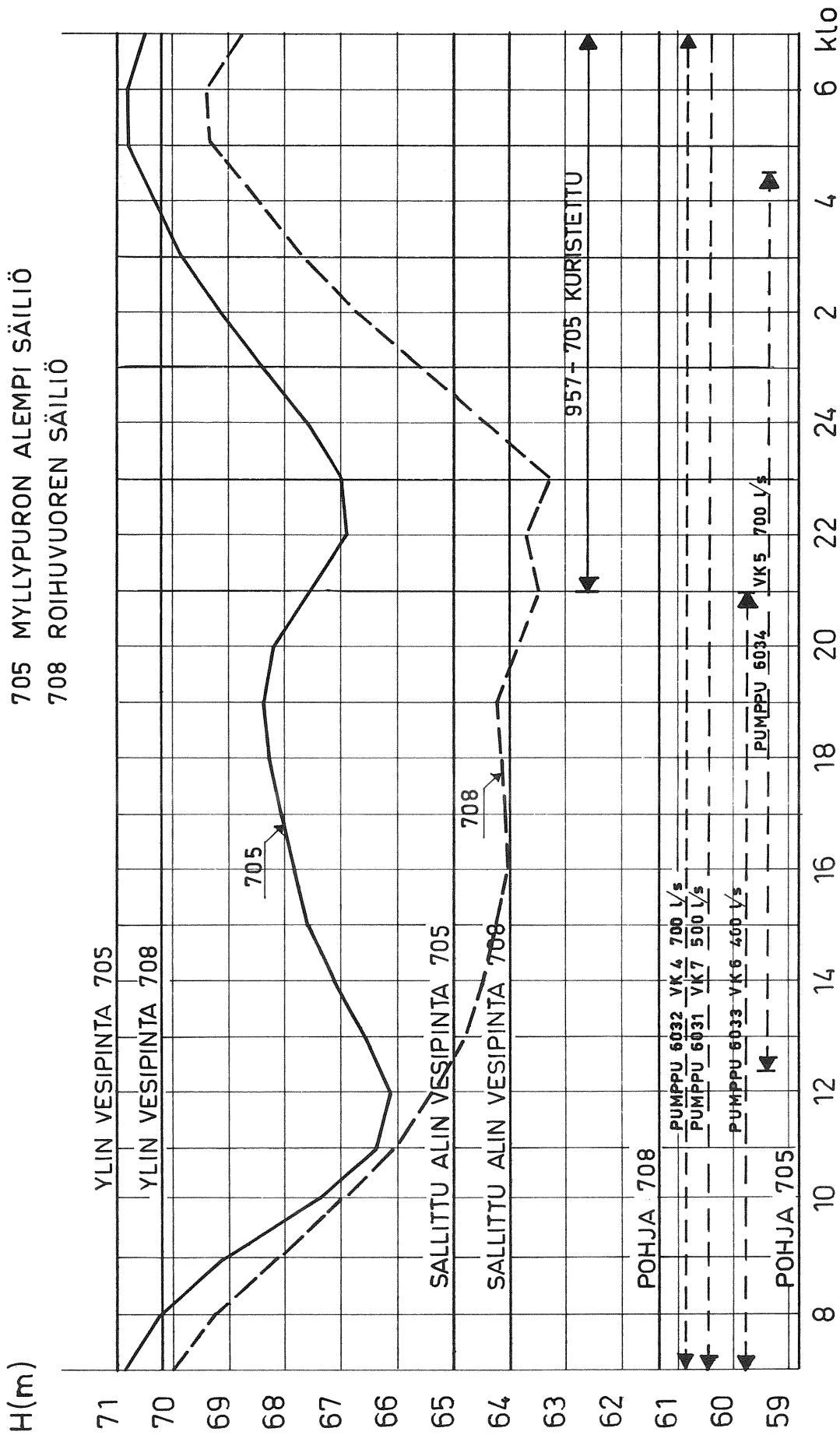


ITÄINEN HELSINKI 1980 (ajo 27.11.-75)
SÄÄTÖ 957-705 $\phi = 0,6$ L=1500 klo 21-7

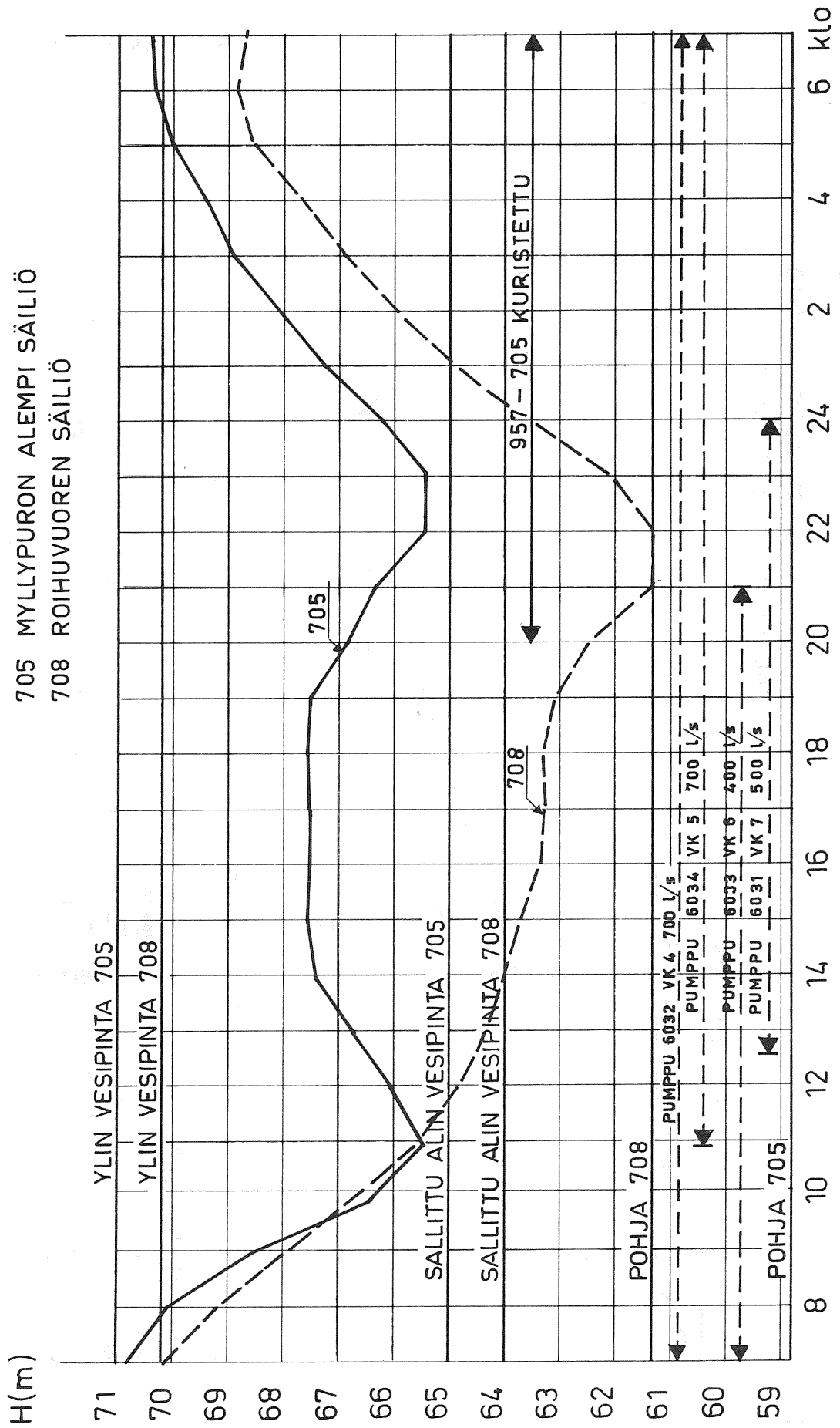
705 MYLLYPURON ALEMPI SÄILIÖ
708 ROIHUVUOREN SÄILIÖ



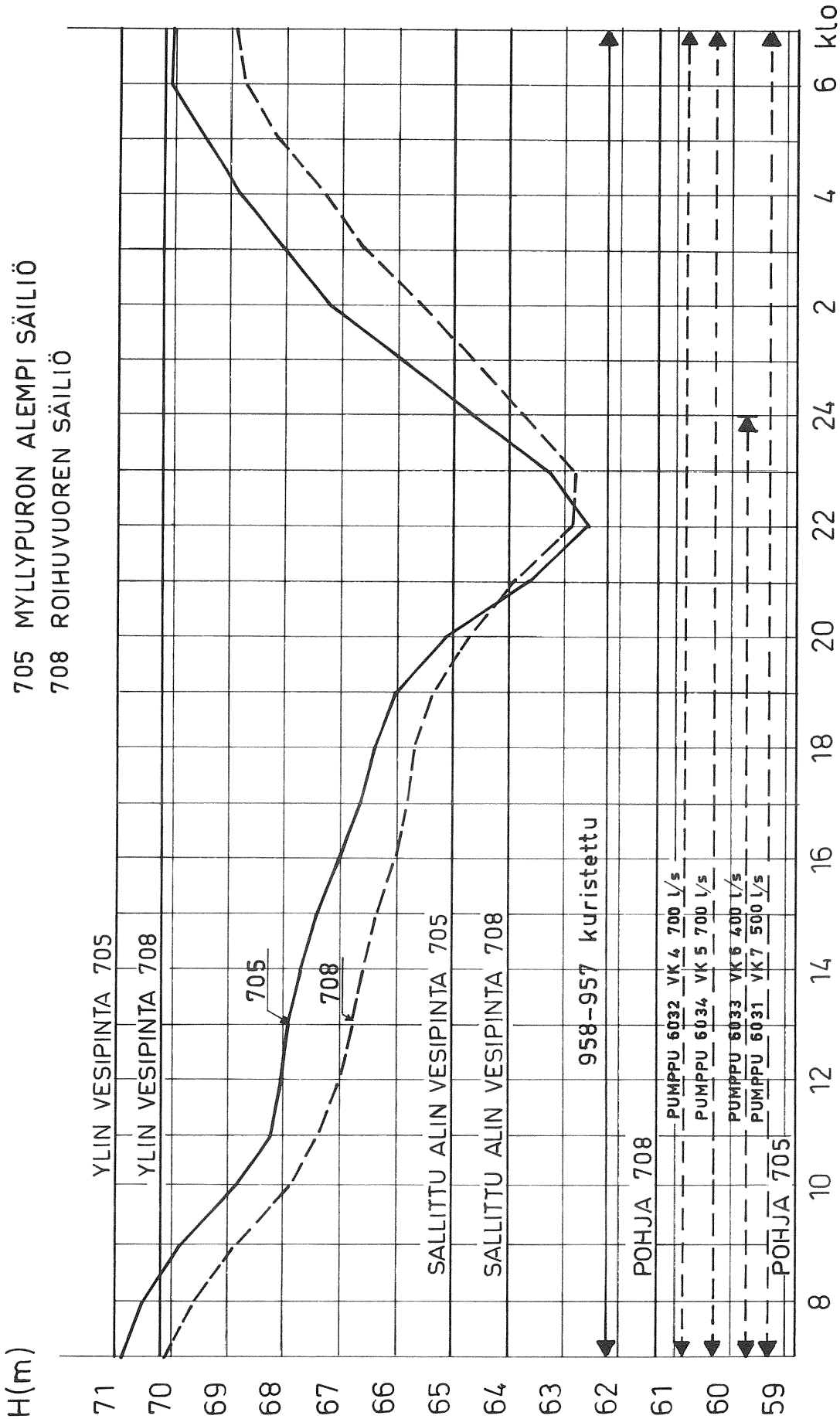
1985 - TILANNE (ajo 8.12 - 75)
SÄÄTÖ 957 - 705 $\phi = 0.6$ L = 1500 klo 21 - 7
705 MYLLYPURON ALEMPI SÄILIÖ
708 ROIHUVUOREN SÄILIÖ



1990 - TILANNE (qjo 27.11-75)
 SÄÄTÖ 957 - 705 $\phi = 0,6$ L=1500 k1o 20 - 7
 705 MYLLYPURON ALEMPI SÄILIÖ
 708 ROIHUVUOREN SÄILIÖ

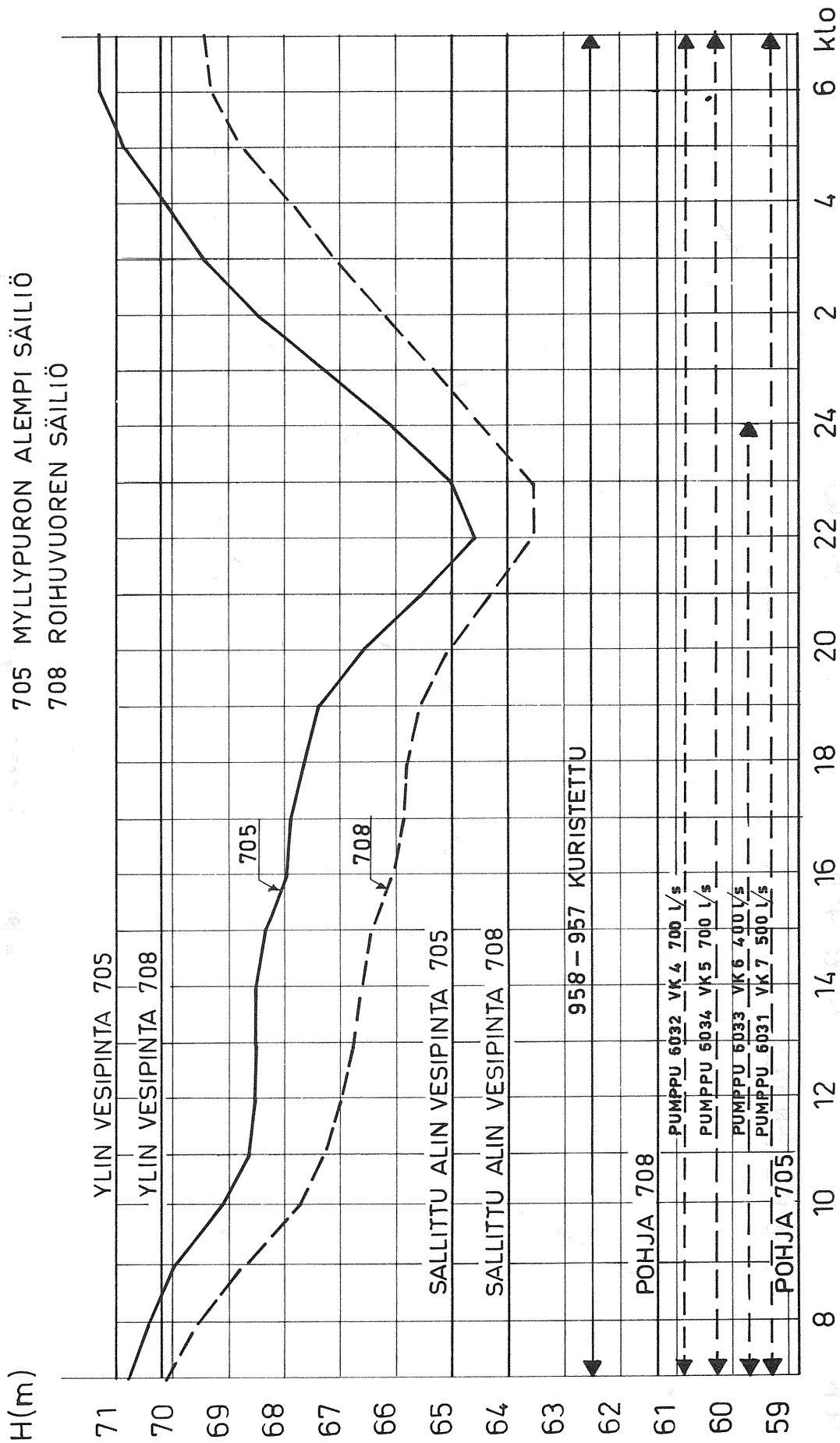


1990 – TILANNE (ajo 10.12-75)
SÄÄTÖ 958-957 $\phi = 0,6$ L=2000 m klo 7-7
705 MYLLYPURON ALEMPI SÄILIÖ
708 ROIHUVUOREN SÄILIÖ

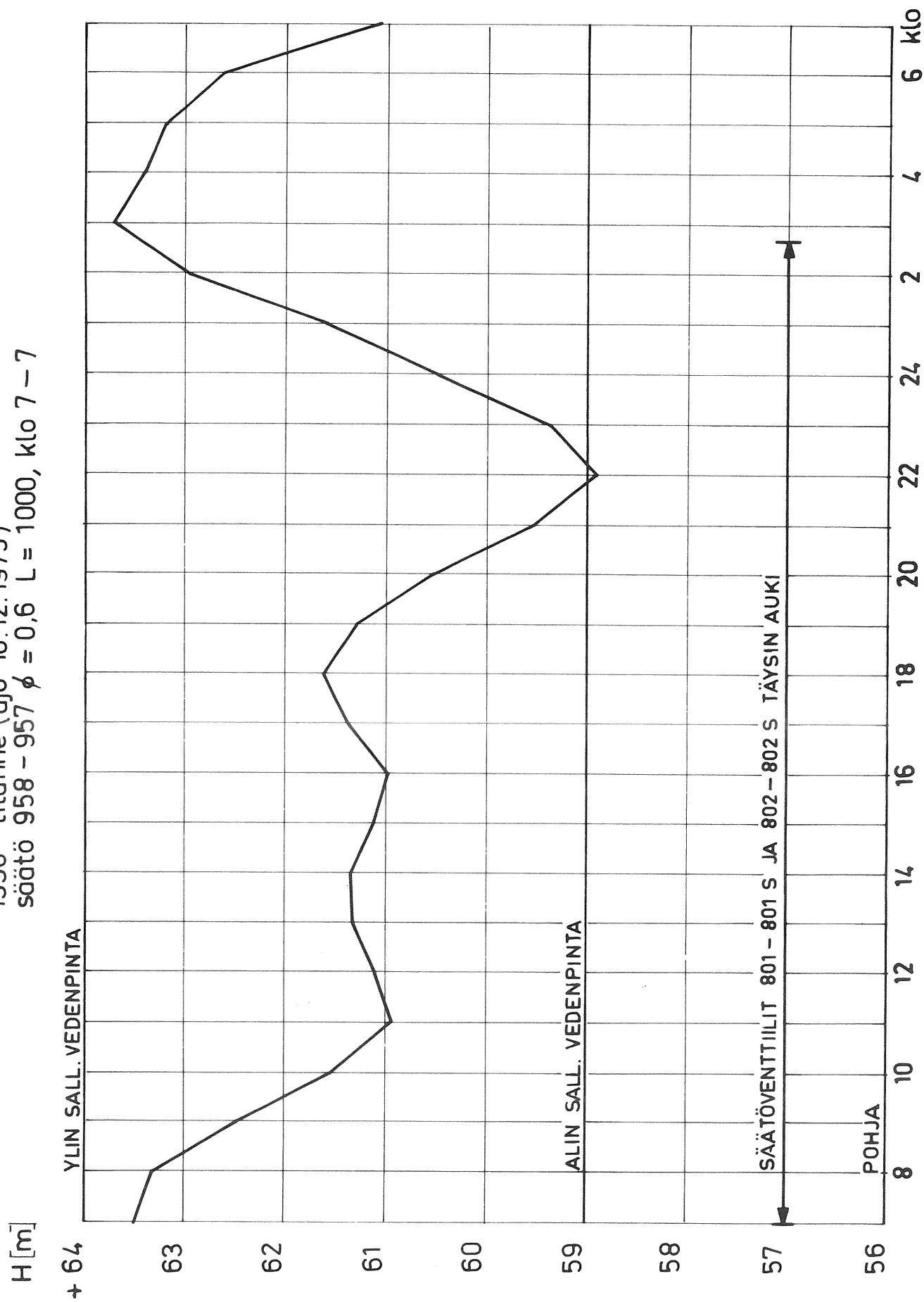


1990 - TILANNE (ajo 10.12-75)
SÄÄTÖ 958 - 957 $\phi=0,6$ L=1000 klo 7-7

705 MYLLYPURON ALEMPI SÄILIÖ
708 ROIHUVUOREN SÄILIÖ



VUOSAAREN SÄILIÖ 707 C
 1990 - tilanne (ajo 10.12.1975)
 säätö 958 - 957 $\phi = 0,6$ L = 1000, klo 7 - 7



KULUTUSKUVIOIDEN KALIBROINNIN LASKENNALLISET KAAVAT

Otetaan käyttöön seuraavat merkinnät:

L_{ij}, L_{ij}^*	kulutustyyppin j keskimääräisiä kulutuksia solmussa i . L_{ij} alkuperäinen, L_{ij}^* korjattu.
$S_j(t), \hat{S}_j(t), S_j^*(t)$	kulutustyyppin j kulutuskuvioita hetkellä t . $S_j(t)$ alkuperäinen, $\hat{S}_j(t)$ välitulos, $S_j^*(t)$ korjattu ko. painepiirin kokonaiskulutuksia
$\hat{C}(t), C(t)$	hetkellä t . $\hat{C}(t)$ on mallin alkuperäinen kulutus ja $C(t)$ toteutunut kokonaiskulutus.
Δ_j	laskennallinen apusuure.

L_{ij}^* voidaan laskea seuraavalla kaavalla

$$L_{ij}^* = \frac{\frac{1}{N} \sum_t C(t)}{\sum_j \frac{1}{N} \sum_t L_{ij}} L_{ij}$$

(N on vuorokauden aikavälien lukumäärä)

$S_j^*(t)$:n laskemiseksi esitetään seuraava algoritmi

1^o laske kaikilla i ja t

$$\hat{S}_i(t) = \frac{S_i(t)}{\frac{1}{N} \sum_k S_i(k)}$$

2^o aseta $t=1$ $\Delta_j = 0$

3^o aseta kaikilla j

$$S_j^*(t) = \frac{C(t)}{\hat{C}(t)} \cdot \hat{S}_j(t); \Delta_j = \Delta_j + S_j^*(t) - \hat{S}_j(t)$$

4^o kaikilla j :

jos $\hat{S}_j(t+1) \geq \Delta_j$

asetta $\hat{S}_j(t+1) = \hat{S}_j(t+1) - \Delta_j$; $\Delta_j = 0$

jos $\hat{S}_j(t+1) < \Delta_j$
asetta $\hat{S}_j(t+1) = 0$; $\Delta_j = \Delta_j - \hat{S}_j(t+1)$

5° jos $t = N-1$ mene kohtaan 7°

6° aseta $t = t+1$; mene kohtaan 3°

7° aseta kaikilla j $S_j^*(N) = \hat{S}_j(N)$

8° loppu.

YVY-julkaisusarja

1. Vesihuollon taloudellisuus
2. Vedenkulutuksen vaihtelut
3. Vesijohtoverkon toiminnan luotettavuus
4. Jätevedenpuhdistamojen allastilojen kattaminen
5. Ammoniakkin poisto pohjavedestä
6. Teurastamojen ja lihanjalostuslaitosten jätevesikuormitus ja jätevesien käsittelymahdollisuudet
7. Maidonjalostusteollisuuden jätevesikuormitus ja jätevesien käsittelymahdollisuudet
8. Vesi- ja jätehuollon laitteiden julkinen testaus
9. Jätehuollon esimerkkisuunnitelman laatiminen keskisuurille kunnille
10. Yhdyskuntien jätehuollon nykytilanne ja tulevaisuuden näkymät
11. Menetelmä taajamien vesihuollon toteuttamisasteen ja kehityksen arvioimiseksi
12. Kaatopaikat 1974
13. Viemärlaitoksen systeemanalyysi
14. Vesihuollon edellyttämä vesistötutkimus
15. Jäteveden puhdistamojen hydraulikan ja dynamiikan tutkiminen merkkilainetekniikalla
16. Vedenjakelujärjestelmän toiminnallinen suunnittelu
17. Vedenjakelujärjestelmän simulointimalli
18. Bandsedimentator
19. Sekaviemärointiverkoston tehonlisäys ja simulointimalli suunnittelumenetelmänä
20. Haja-asutuksen viemärointi ja jätehuolto
21. Jätevesilietteen hyödyntämisen perusteet
22. Patogeenisten mikro-organismien määrittäminen kalkkilietteestä
23. Kaatopaikan valinta ja kunnossapito
24. Maaseutuyhdyskunnan jätehuolto

ISBN 951-9250-65-4
ISSN 0355-1997

KYRIIRI OY 4573
Helsinki 1978